

# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Renan de Faveri

Modelagem Térmica de Transformadores – Método de  
Regressão Linear Múltipla para Previsão de Variáveis

Itajubá, maio de 2021



# **UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Renan de Faveri

Modelagem Térmica de Transformadores – Método de  
Regressão Linear Múltipla para Previsão de Variáveis

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica**

**Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência  
Orientador: Prof. Dr. Estácio Tavares Wanderley Neto**

Itajubá, maio de 2021

Folha de aprovação.

*Ao Professor Manuel Luis Barreira Martinez (in memoriam), responsável direto no meu desenvolvimento acadêmico e profissional, além dos muitos ensinamentos que mudaram o rumo da minha vida.*

## Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me dado a vida. À equipe do LAT-EFEI Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá, em especial aos professores Dr. Estácio Tavares W. Neto e Dra. Alessandra Freitas Picanço que me orientaram no desenvolvimento do trabalho. Outros muito importantes que eu tive a honra de trabalhar, como o Professor Dr. Credson de Salles, o Me. Thiago Arantes Nogueira, Cleython Silvestre, João Cândido e a tantos outros que me ajudaram durante a minha vida no LAT. Gostaria de agradecer também aos companheiros Luís Felipe Leite, Tiago Machado e Luís Scopel que me auxiliaram em boa parte da modelagem da aquisição dos dados. Finalmente e com muito carinho agradeço a minha família pelo apoio em cada etapa da minha formação, dedico esse trabalho a minha filha Laura de Faveri, por servir de inspiração e motivo de força para não desistir.

*“Revelemo-nos, mais por atos do que por palavras, dignos de possuir este grande país”.*

Theodomiro Carneiro Santiago (1882-1936)

## Resumo

Para operação do transformador, o controle de temperatura desempenha papel fundamental, visto que esta é o principal limitante para o carregamento do transformador, afetando diretamente a sua vida útil. Dentro deste contexto este trabalho se propõe a estudar o comportamento térmico de transformadores com base nos dados do seu histórico gerado pelo sistema supervisorio, e nos dados do clima gerados por uma estação meteorológica instalada na subestação. Este estudo utiliza a regressão linear para encontrar correlações entre a temperatura do transformador e outros parâmetros de operação. A análise de correlação tem o objetivo de verificar as inferências estatísticas das medidas de associação linear como o coeficiente de correlação múltiplo, que verifica a “força” ou “grau” de relacionamento linear entre uma variável e um conjunto de outras variáveis. Com esta informação levanta-se a tendência para a curva de elevação de temperatura do transformador e parâmetros como o seu carregamento. Foi então realizada uma aplicação de previsão das variáveis térmicas de um transformador trifásico 230/138/13,8 kV, 150 MVA utilizando temperatura do óleo, temperatura dos três enrolamentos, temperatura ambiente e potência ativa durante uma janela de observação de 7 dias com intervalos de 5 minutos entre as coletas. Após o tratamento e a tabulação das informações coletadas, foram estudadas situações diversas de correlação sendo em cada análise escolhido um parâmetro como principal, ou dependente. Ao final das simulações foram encontrados alguns valores de R quadrado para cada situação, e conseqüentemente equações que representam a variável dependente. Ao se calcular a variável dependente com as equações encontradas, notou-se que a melhor equação para predição de situações de carregamento e de temperatura, foi aquela que utilizou mais variáveis independentes sendo os valores calculados mais próximos ao valor medido pelo supervisorio SAGE. Finalmente, a partir da modelagem do sistema, a ferramenta poderá ser incorporada ao sistema SCADA do centro de operações das concessionárias de energia para auxílio nas análises de previsão de temperaturas do equipamento em situações críticas, ou mesmo, pode servir de auxílio para substituição em tela dos valores em caso de falha do equipamento de aquisição.

Palavras-chave: transmissão de calor, modelos térmicos, aquecimento de transformador, refrigeração, regressão linear.



## Abstract

For the proper operation of transformers, the temperature control is fundamental, since temperature is the main limiting factor for the load of the transformer, directly affecting its lifespan. In this context, this work aims to study the thermic behaviour of transformers using data acquisition, using the database generated by the supervisory system and climate data collected by a meteorological station installed in the substation area, using linear regression analysis tool, and searching for correlations between the temperature of the transformer and other operational parameters. The correlation analysis aims to verify the statistical inferences of the linear association parameters such as the multiple correlation coefficient, which measures the “strength” or “degree” of linear relation between a variable and a set of other variables. This way, it is possible to generate a tendency for the temperature rise curve of the transformer and parameters such as its load. Therefore, an application to predict the thermal variables of a three-phase 230/138/13.8, 150 MVA transformer using oil, windings and room temperatures and active power collected in intervals of 5 minutes was developed. After treatment and tabulation of the collected information, various correlation situations were studied in each analysis, where one parameter was chosen as main or dependent. By the end of the simulations, the r-square value for each scenario was found, and consequentially the equations that represent the dependent variable. By recalculating the dependent variable through these equations, it was noticed that the best equation for the prediction of load and temperature situations was the one that used more independent variables, being the one closest to the value measured by the SAGE supervisory. Ultimately, through system modelling, this tool can be incorporated to the SCADA system in the operation centre of the power distribution companies to assist on equipment temperature prediction analysis on critical situations, or as an assist tool for data refreshment in case of a failure on the acquisition equipment.

Keywords: heat transfer, thermic models, transformer temperature rise, cooling, linear regression.

## Lista de Figuras

FIGURA 1 - VISÃO GERAL DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA (SEP) FONTE: PRÓPRIO AUTOR.....	21
FIGURA 2 - TRANSFORMADOR IDEAL [2] .....	22
FIGURA 3 - CICLO DE CARGA DIÁRIO [12].....	30
FIGURA 4 - REFRIGERAÇÃO OIL NATURAL AIR NATURAL (ONAN)[16] .....	35
FIGURA 5 - RESFRIAMENTO OIL NATURAL AIR FORCED (ONAF) .....	36
FIGURA 6 - RESFRIAMENTO OIL FORCED AIR FORCED (OFAF)[16] .....	37
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR VERTICALMENTE [14].....	39
FIGURA 8 - DIAGRAMA DAS TEMPERATURAS NA TRANSMISSÃO DE CALOR PELA PAREDE DA CAIXA DO TRANSFORMADOR [14]. .....	41
FIGURA 9 - CONDUÇÃO DO CALOR ENTRE PAREDES PLANAS [14].....	43
FIGURA 10 - A) DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA B) DISTRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA [14] .....	45
FIGURA 11 - A) DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA B) DISTRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA CALORÍFICA [14] .....	47
FIGURA 12 - A) DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA B) DISTRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA CALORÍFICA [14] .....	48
FIGURA 13 - A) DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA B) DISTRIBUIÇÃO DA POTÊNCIA CALORÍFICA [14] .....	49
FIGURA 14 - ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA E VELOCIDADE NAS ZONAS DE CIRCULAÇÃO DE FLUÍDO [14].....	50
FIGURA 15 - T TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO: $T_1 > T_2$ [14] .....	54
FIGURA 16 - FLUXOGRAMA DE TRABALHO PARA A MODELAGEM .....	67
FIGURA 17 - ESQUEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	70
FIGURA 18 - ESTAÇÃO METEOROLÓGICA PARA TEMPERATURA AMBIENTE.....	71
FIGURA 19 - PARTE DO ARQUIVO DE AQUISIÇÃO EXPORTADO PELO SAGE.....	72
FIGURA 20 - INÍCIO DA PRIMEIRA AQUISIÇÃO .....	72
FIGURA 21 - DECLARAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE INTERESSE.....	73
FIGURA 22 - MEDIDAS DO PRIMEIRO INSTANTE.....	73
FIGURA 23 - MEDIÇÕES DE TEMPERATURA DO TRANSFORMADOR.....	74
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO ÓLEO CALCULADA E MEDIDA – SITUAÇÃO 1 .....	77
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO ÓLEO CALCULADA E MEDIDA – SITUAÇÃO 2.....	79
FIGURA 26 - COMPARAÇÃO ENTRE TEMPERATURA DO ÓLEO CALCULADA E MEDIDA – SITUAÇÃO 3.....	81
FIGURA 27 - GRÁFICO COM TODAS AS SITUAÇÕES E A TEMPERATURA MEDIDA DO ÓLEO .....	82
FIGURA 28 - CÁLCULO DAS SITUAÇÕES FORA DA JANELA DE OBSERVAÇÃO. ....	84

## Lista de Tabelas

TABELA 1 - ATIVIDADES MÍNIMAS E PERIODICIDADE [13] .....	31
TABELA 2 - LIMITES DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA °C - NBR 5356-2/2020 [18].....	38
TABELA 3 - GAMA DE VARIAÇÃO NOS DIVERSOS SALTOS DE TEMPERATURA [14].....	42
TABELA 4 - COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DE ALGUNS MATERIAIS [14] .....	44
TABELA 5 - COEFICIENTES DE CONVECÇÃO E RADIAÇÃO [14] .....	56
TABELA 6 - PRINCIPAIS DADOS DO TRANSFORMADOR MODELADO .....	69
TABELA 7 - MEDIÇÕES DAS VARIÁVEIS OBSERVADAS – PARTE DAS OBSERVAÇÕES .....	70
TABELA 8 - ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO DA SITUAÇÃO 1 .....	76
TABELA 9 - TABELA DE COEFICIENTES DA SITUAÇÃO 1.....	76
TABELA 10 - ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO DA SITUAÇÃO 2.....	78
TABELA 11 - TABELA DE COEFICIENTES DA SITUAÇÃO 2 .....	78
TABELA 12 - ESTATÍSTICAS DE REGRESSÃO DA SITUAÇÃO 3.....	80
TABELA 13 - TABELA DE COEFICIENTES DA SITUAÇÃO 3 .....	80
TABELA 14 -COLETA DAS MEDIDAS DO SAGE DE 1 CICLO DIÁRIO DE OPERAÇÃO DO TF1 .....	83
TABELA 15 - COMPARAÇÃO ENTRE O CALCULADO E O MEDIDO.....	83

## Lista de Abreviaturas e Siglas

SEP	Sistema Elétrico de Potência
SCADA	<i>Supervisory Control &amp; Data Acquisition System</i>
f.m.m.	Força Magnetomotriz
e.f.	Força Eletromotriz
OMI	Óleo Mineral Isolante
ANP	Agência Nacional do Petróleo
OVI	Óleo Vegetal Isolante
ONAN	Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Natural
ONAF	Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Forçada
OFAN	Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Natural
OFAF	Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Forçada
OFWF	Óleo com Circulação Forçada e Água com Circulação Forçada
NBR	Norma Brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
AT	Alta Tensão
MT	Média Tensão
BT	Baixa Tensão

## Lista de Símbolos

$P_1$	Potência Primária do Transformador.
$P_2$	Potência Secundária do Transformador.
$I_1$	Corrente Primária do Transformador.
$I_2$	Corrente Secundária do Transformador.
$V_1$	Tensão Primária do Transformador.
$V_2$	Tensão Secundária do Transformador.
$\Phi$	Fluxo Magnético
$R$	Relutância Magnética.
$e_1$	Tensão Induzida Primário do Transformador.
$e_2$	Tensão Induzida Secundário do Transformador.
$N_1$	Número de Espiras Primário do Transformador.
$N_2$	Número de Espiras Secundário do Transformador.
$\theta_0$	Temperatura máxima do óleo, denominada de temperatura de topo e medida na parte superior do óleo.
$\theta_a$	Temperatura média do ambiente.
$\theta_C$	Temperatura média do cobre medida por variação de resistência.
$\theta_{01}$	temperatura média do óleo para a altura “ $h_1$ ” das bobinas.
$\theta_{02}$	temperatura média do óleo para a altura “ $h_2$ ” dos radiadores.
$\Delta\theta_0$	elevação da temperatura máxima do óleo.
$\Delta\theta_{01}$	elevação da temperatura média do óleo para “ $h_1$ ”.
$\Delta\theta_{02}$	elevação da temperatura média do óleo para “ $h_2$ ”.
$\Delta\theta_{ca}$	elevação da temperatura média do cobre dos enrolamentos.
$\Delta\theta_{C01}$	diferença de temperatura entre o óleo médio para a altura “ $h_1$ ” e o cobre dos enrolamentos.
$\Delta\theta_{001}$	diferença de temperatura entre o óleo máximo e o óleo médio para a altura “ $h_1$ ”.
$A$	área da parede ( $m^2$ ).
$d$	espessura da parede (m).
$W$	energia calorífica por segundo transmitida através da parede expressa em watts.
$\lambda$	coeficiente de condutividade térmica em $watts/m \cdot ^\circ C$ .
$\delta$	espessura do isolamento entre placas
$\alpha_c$	coeficiente de convecção ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ).
$\varepsilon$	emissividade do corpo.

# Sumário

Agradecimentos .....	6
Resumo .....	8
Abstract.....	9
Lista de Figuras .....	10
Lista de Tabelas .....	11
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	12
Lista de Símbolos .....	13
Sumário.....	14
1. Introdução.....	16
1.1. Motivação.....	16
1.2. Objetivo.....	17
1.3. Revisão Bibliográfica .....	17
1.4. Organização do Trabalho .....	20
2. Transformadores de Potência .....	21
2.1. Função no Sistema.....	21
2.2. Princípio de Funcionamento.....	22
2.3. Partes Constituintes .....	24
2.3.1. Enrolamentos .....	25
2.3.2. Núcleo .....	25
2.3.3. Tanque.....	25
2.3.4. Radiadores.....	26
2.3.5. Isolação .....	26
2.4. Óleo Isolantes .....	26
2.4.1. Óleo Mineral Isolante (OMI).....	28
2.4.2. Óleo Vegetal Isolante (OVI).....	29
2.4.3. Condições Operativas .....	30
2.5. Plano de Manutenção .....	31
2.6. Comportamento Térmico dos Transformadores.....	33
3. Cálculo Térmico .....	34
3.1. Sistemas de Refrigeração para Transformadores Imersos em Óleo.....	35
3.1.1. ONAN: Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Natural.....	35
3.1.2. ONAF: Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Forçada. ....	36
3.1.3. OFAN ou OFAF: Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Natural, ou, Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Forçada. ....	36
3.1.4. OFWF: Óleo com Circulação Forçada e Água (Water) com Circulação Forçada. ....	37
3.2. Limites de Elevação de Temperatura .....	37
3.3. A Distribuição da Temperatura em um Transformador .....	39
3.4. A Transmissão de Calor por Condução.....	42
3.4.1. Entre Paredes Planas .....	42
3.4.2. Placas Paralelas que são Fontes de Calor .....	44
3.5. A Transmissão de Calor por Convecção .....	50
3.6. A Transmissão de Calor por Radiação .....	53
3.7. Aplicação.....	56
4. Regressão Linear .....	57
4.1. Modelo de Regressão Linear Simples .....	57
4.2. Modelo de Regressão Linear Múltipla .....	60
4.3. Aplicação.....	66

5.	Modelagem de um Estudo de Caso .....	67
6.	Análise de Resultados .....	76
6.1.	Situação 1 .....	76
6.2.	Situação 2 .....	78
6.3.	Situação 3 .....	79
6.4.	Comparação entre as Situações .....	81
6.5.	Cálculo da Temperatura do Óleo fora da Janela de Observação.....	83
7.	Conclusões.....	86
8.	Referências .....	88

# 1. Introdução

Os Transformadores de Potência desempenham uma função de destaque no Sistema Elétrico de Potência (SEP), pois, entre outras funções, eles são importantes para a interligação de partes do sistema que possuem níveis de tensão diferentes. Esses equipamentos utilizam o óleo isolante para resfriamento e isolamento de sua parte ativa e necessitam de um programa de manutenção preventiva periódico que visa detectar possíveis falhas.

Normalmente, programas de manutenção preventiva são utilizados pelas empresas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Eles objetivam evitar que as falhas venham provocar a retirada do equipamento do sistema elétrico, o que significa grandes perdas financeiras, seja pela diminuição do faturamento, seja pelo pagamento de multas à agência reguladora, além da diminuição da confiabilidade do sistema. Além disso, a introdução relativamente recente do óleo vegetal como meio isolante, visando a utilização de um material com apelo ecológico e baixo custo, traz novos desafios à manutenção e à vida útil destes equipamentos.

## 1.1. Motivação

Nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, os transformadores de potência são equipamentos de alto custo e de importância estratégica. A sua substituição, o transporte e a pouca disponibilidade de reservas técnicas, em caso de defeito, provocam grandes problemas às concessionárias e conseqüentemente aos consumidores. A confiabilidade do sistema, tanto sistêmica como perante os consumidores, são afetadas com longas interrupções de fornecimento decorrentes de defeitos nesses equipamentos.

É comum, por diversos fatores operacionais de manutenção ou indisponibilidades temporárias, a operação dos sistemas de energia necessita de transferir blocos de carga elétrica entre transformadores de potência. Na grande parte desses casos, essas manobras podem proporcionar sobrecargas, as quais aumentam a temperatura de trabalho e reduz a vida útil destes equipamentos.

As concessionárias possuem padrões de operação para casos de sobrecarga, seguindo limites de tempo e carga com um acompanhamento através das temperaturas de operação como uma maneira de controle dos prazos de manutenção. Cada vez mais as empresas vêm modernizando os seus sistemas com automação, monitoramento e controle das subestações. Porém a simples coleta das informações quando não analisadas ficam apenas como informações



históricas da planta de energia. Por outro lado, o tratamento dos dados, análises e extração de resultados podem auxiliar a operação das empresas a propor novas técnicas para a utilização mais eficiente dos equipamentos.

A utilização de modelos matemáticos para simular o regime térmico-operativo de transformadores de potência pode ser utilizado para a melhora do fator de carregamento dos equipamentos; e simular os períodos críticos de quantidade e duração das sobrecargas em condições de elevadas temperaturas. Estas possibilidades ainda consideram que um mesmo equipamento pode ser instalado em regiões diferentes com disparidade de condições climáticas.

## **1.2. Objetivo**

Este trabalho tem o objetivo de propor uma ferramenta auxiliar para a análise do comportamento térmico de um transformador de potência imerso à óleo, ou seja, uma opção para análise de variáveis térmicas do equipamento que podem apoiar a equipe de operação no estudo de situações críticas ou atípicas de funcionamento.

Outra aplicação possível é o planejamento dos prazos de manutenção dos transformadores. Desta forma, a análise poderia gerar resultados quanto ao desgaste do transformador extrapolando o funcionamento histórico com previsão de carregamento por determinados períodos. Em outras palavras, fazer a simulação do comportamento térmico futuro de acordo com o histórico de trabalho.

## **1.3. Revisão Bibliográfica**

A revisão bibliográfica consultada foi direcionada ao transformador de potência e o seu comportamento térmico nos ciclos de operação. Na referência dos autores UMANS [1], Frontin [2], Kosow [3], Harlow [4], Flanagan [5] e Mamede [6] são explicados os conceitos básicos dos transformadores de potência, as teorias que explicam o seu funcionamento e as partes constituintes do equipamento. Além disso é mostrado alguns conceitos sobre comportamento térmico, meios de transporte e tipos de óleos isolantes. Conceitos sobre vida útil é citado e mostrado a importância na análise operativa e retorno econômico.

A norma NBR5356/2020 Parte 1[7] fornece os requisitos para o dimensionamento dos equipamentos transformadores de potência, assim como a padronização das informações necessárias em dados de placa dos equipamentos. Além de explicar as características

construtivas e elétricas exigidas.

A norma ASTM D2140 [8] apresenta como objetivo a caracterização da composição do tipo carbono de um óleo, sendo aplicável também na observação do efeito sobre a constituição do óleo de vários processos de refino, como hidrotreatamento, extração com solvente e assim por diante, tem uma aplicação secundária ao relacionar a natureza química do óleo a outros fenômenos que demonstraram estar relacionados à composição do óleo. Esta norma pode ser usada para determinar a composição do tipo carbono de óleos minerais isolantes por correlação com propriedades físicas básicas. Para fins analíticos de rotina, elimina a necessidade de procedimentos complexos de separação fracionária e purificação. Outra utilidade é determinar a composição do tipo carbono de óleos isolantes elétricos dos tipos comumente usados em transformadores de energia elétrica e cabos de transmissão. Destina-se principalmente ao uso com novos óleos, inibidos ou não.

Os projetos de transformadores devem respeitar algumas diretrizes que atendem os requisitos de operação do sistema elétrico de potência, assim como as determinações das normas e órgãos regulamentadores, como é explicado pela norma NBR5356/2017 [9] e pela referência [10] da ONS que faz um levantamento de diretrizes para projetos de empreendimentos de transmissão.

O autor Uhren [11] em seu trabalho de mestrado faz a avaliação do desempenho do óleo vegetal isolante (OVI) em transformadores de distribuição e reguladores de tensão, visando aprimorar o uso desse tipo de material no setor elétrico. Em seu estudo é apresentado as características elétricas do OVI sendo confrontado os pontos fortes e fracos do uso dessa tecnologia.

A Resolução Normativa 903/2020 – Submódulo 2.6 [12] estabelece os requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos, os quais se aplicam às instalações de transmissão integrantes ou que venham a integrar a Rede Básica ou as instalações de transmissão de energia elétrica destinadas a interligações internacionais conectadas à Rede Básica e aos agentes de geração, de distribuição, de importação/exportação e consumidores responsáveis por subestações com conexão às instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão. No item 4.1.4 são mostradas as condições operativas para uma unidade transformadora de potência que deve garantir o funcionamento em carregamento normal e em condição de emergência de curta e longa duração ao longo da vida útil do transformador.

A RN861[13] da ANEEL define as atividades mínimas de manutenção preditiva e preventiva e suas periodicidades para transformadores de potência e autotransformadores, além

de outros equipamentos. Essas atividades são de extrema importância para diminuição das falhas desses dispositivos garantindo uma maior confiabilidade do sistema elétrico de potência.

O autor Ries [14] em seu livro traz toda fundamentação teórica dos transformadores de potência, desde seus princípios básicos e características de desempenho em operação nos sistemas elétricos. Na obra um capítulo é dedicado ao cálculo térmico apresentando a distribuição de temperaturas internas e as formas de transmissão de calor.

No livro de Martín [15] é apresentado além da teoria básica dos transformadores de potência, os capítulos de projeto são explicados para cada disciplina que compõe o equipamento, varrendo assuntos de esforços mecânicos, dimensionamentos de enrolamentos e cálculo de temperatura dos equipamentos transformadores.

O trabalho de Kulkarni & Khaparde [16] fornece também embasamento teórico, porém com foco no projeto do equipamento, para o trabalho foi verificado os mecanismos de refrigeração do óleo e utilizados os esquemas que mostram o funcionamento desses sistemas.

O catálogo da WEG [17] forneceu para o trabalho as características construtivas de transformadores e folhas de dados de alguns modelos de transformadores.

A norma NBR5356/2007 Parte 2 [18] classifica os transformadores em função dos seus métodos de controle de resfriamento, determina os limites de elevação de temperatura e apresenta os métodos de ensaios para a medição da elevação de temperatura.

Após a utilização de alguns títulos voltados às teorias do transformador, foi pesquisado sobre a ferramenta matemática a ser utilizada nas modelagens. Para isso o livro de Bussab & Morettin [19], a obra de Hoffmann [20] e o trabalho de Spiegel [21] foi utilizada para as demonstrações do método de Regressão Linear Simples e Múltipla.

A tese de doutorado de Ferreira [22] e a dissertação de Destefani [23] foram de grande contribuição para o desenvolvimento desse trabalho, pois ambos apresentam o problema de modelagem de transformadores de potência através da utilização da Regressão Linear Múltipla, o que forneceu as ferramentas necessárias para as análises iniciais propostas por esse trabalho, que basicamente era criar um modelo de simulação que poderia ser utilizado para a operação como auxílio em situações críticas, falhas de medição de variáveis térmicas e planejamento de manutenções.

Por fim, a referência [24] apresenta o software SAGE desenvolvido pelo CEPTEL, onde se é feita uma pequena apresentação do produto e seus recursos como um supervisor.

## 1.4. Organização do Trabalho

Esta pesquisa está direcionada, primeiramente, à utilização da ferramenta de regressão linear múltipla para observação das variáveis térmicas dos transformadores de acordo com os registros feitos pelo sistema supervisor SCADA. Portanto, a temperatura do óleo foi escolhida como uma variável dependente; e as temperaturas dos enrolamentos, a temperatura ambiente e a potência ativa foram determinadas como variáveis independentes para cada instante de observação. Deste modo, foi feita a análise do modelo através do teste para três situações distintas, mudando apenas a combinação e o número das escolhas das variáveis independentes. Após essa primeira parte, foi calculado a temperatura do óleo do equipamento para um período fora da janela de observação utilizado para encontrar a equação de temperatura de óleo com o objetivo de comparar os valores calculados com os medidos.

Finalmente o teste do método para o uso dos dados dos resultados é proposto na melhoria dos esquemas de automação e manutenção preventiva dos transformadores de potência.

Os capítulos que seguem apresentam as etapas necessárias para o entendimento do uso da regressão linear múltipla no cálculo e previsão das temperaturas do óleo de um transformador de potência.

O capítulo 2 discorre sobre a definição de transformadores de potência, como este equipamento está inserido no SEP, seus principais componentes, análises das técnicas de manutenção preventivas e corretivas.

O capítulo 3 faz uma apresentação sobre o comportamento térmico das partes constituintes do transformador de potência.

O capítulo 4 compreende a apresentação da ferramenta de regressão linear utilizada nas simulações de um equipamento usado como modelo para geração de resultados.

O capítulo 5 apresenta a modelagem de um estudo de caso de um equipamento inserido em uma instalação.

O capítulo 6 mostra os resultados por meio dos métodos de análise e previsão do comportamento térmico do transformador.

Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões desse trabalho e as sugestões de trabalhos futuros.

## 2. Transformadores de Potência

### 2.1. Função no Sistema

O transformador de potência é um dispositivo que tem por função transmitir energia elétrica ou potência elétrica de um circuito a outro, transformando as magnitudes das correntes e tensões de mesma frequência ou modificando os valores de impedância de um circuito [1].

Os níveis de tensão em corrente alternada são escolhidos com base em alguns critérios para cada subsistema do SEP como exemplificado na figura 1. Em sistemas de distribuição são utilizados níveis mais baixos. Para a segurança humana, em pontos de entrega a consumidores residenciais são adotados níveis de 380/220/127 V. Em geradores síncronos são utilizadas tensões de até 25 kV, devido às limitações impostas pela espessura da isolação. Em sistemas de transmissão a longas distâncias, objetivando a alta capacidade de potência com perdas relativamente baixas, são escolhidos níveis mais altos que podem ultrapassar 1000 kV [2].

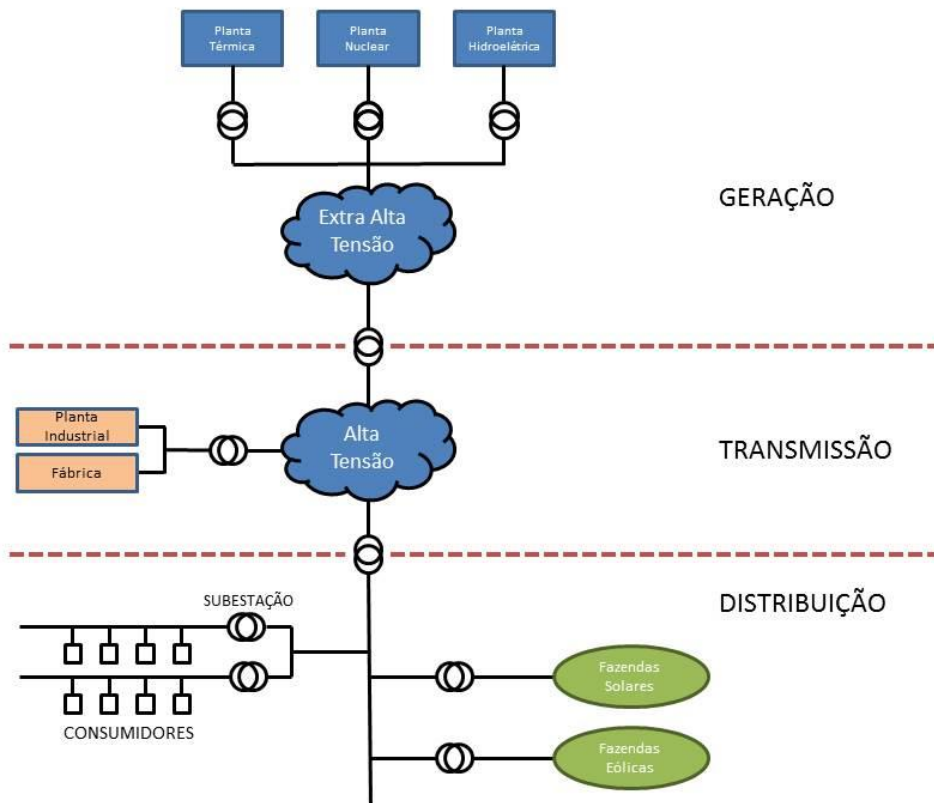


Figura 1 - Visão Geral de um Sistema Elétrico de Potência (SEP) Fonte: Próprio Autor.

Nota-se, portanto a necessidade de transformar o nível de tensão nos diversos pontos do

sistema elétrico, tornando o transformador um equipamento de destaque para o seu bom funcionamento. Normalmente esses equipamentos estão localizados entre geradores e linhas de transmissão, e entre linhas com diferentes níveis.

## 2.2. Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento do transformador consiste na utilização de dois enrolamentos desconectados eletricamente, porém interagindo entre si por meio de um fluxo magnético, baseados na lei de Biot-Savart e na lei de indução de Faraday-Neumann-Lenz. A primeira afirma que a corrente elétrica produz campo magnético, e a segunda implica que um campo magnético variável no interior de um circuito induz, em seus terminais, tensão elétrica de magnitude diretamente proporcional à taxa temporal de variação do fluxo magnético no circuito [1].

Em outras palavras pode-se definir um transformador de potência como um equipamento elétrico estático que possui dois ou mais enrolamentos e tem a capacidade de transformar um conjunto de tensões e correntes alternadas, à mesma frequência, em outro conjunto de tensões e correntes de forma proporcional, com o objetivo de transmitir potência elétrica como mostrado na figura 2.

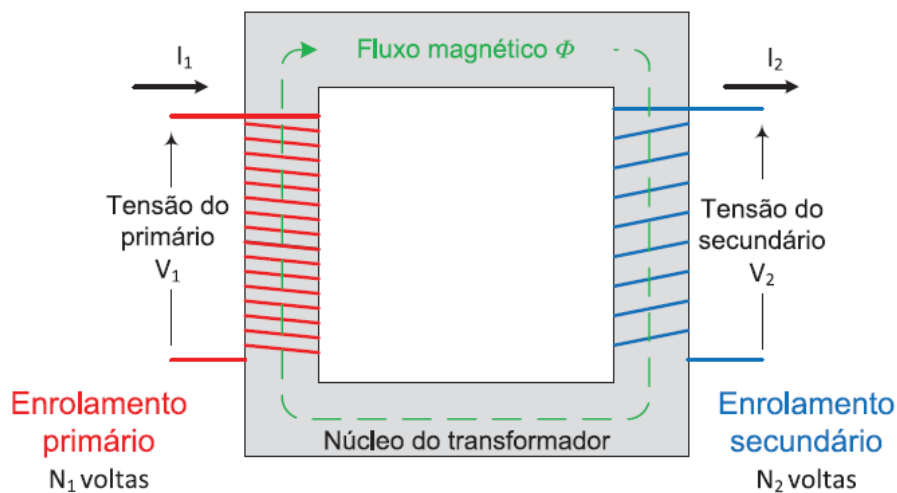


Figura 2 -Transformador Ideal [2]

Um dos enrolamentos, denominado primário, é conectado a uma fonte alternada. O segundo enrolamento, denominado secundário, é destinado a suprir uma carga, caso o equipamento possua o terceiro enrolamento, denominado terciário, este também pode ser

conectado para suprir cargas auxiliares nas subestações, como alimentação dos retificadores e circuitos de tomada e aquecimento [2].

Considera-se um transformador ideal de dois enrolamentos (figura 2), ou seja, a permeabilidade  $\mu$  do núcleo é infinita, não existe dispersão de fluxo e as perdas no núcleo e na resistência dos enrolamentos são nulas.

O enrolamento do lado esquerdo, denominado de primário, pode estar conectado a uma fonte de potência, como um gerador, enquanto do lado direito, ou enrolamento secundário, pode suprir uma carga. Por ser um transformador ideal, a potência injetada no terminal primário é a mesma potência fornecida no secundário, pois não se tem aquecimento e perdas ou dispersão de fluxo, ou seja:

$$P_1 = P_2 \quad (01)$$

$$I_1 \cdot V_1 = I_2 \cdot V_2 \quad (02)$$

O produto da corrente  $I_1$  com o número de voltas  $N_1$  no enrolamento primário fornece a força magnetomotriz (f.m.m.), que produz o fluxo magnético  $\Phi$  dentro do núcleo. Pelo fato do material de que é constituído o núcleo de ferro ter alta permeabilidade magnética ou baixa relutância  $R$ , significativamente inferior à do ar em volta, o fluxo é capturado pelo núcleo.

Uma força eletromotriz (f.e.m.) proporcional à taxa de variação do fluxo é induzida no enrolamento secundário, no qual ocorre então uma corrente  $I_2$  de valor determinado pela impedância a ele conectada. A f.e.m. é proporcional ao número de voltas  $N_2$  desse enrolamento ao redor do núcleo. Se tanto o primário quanto o secundário têm a mesma quantidade de voltas, a tensão é a mesma em ambos os terminais do transformador. Para aumentar a tensão, a quantidade de voltas do secundário deve ser superior à do primário, assim para o caso contrário essa proporcionalidade deve ser respeitada [3].

O fluxo é variável de forma senoidal no núcleo. Assim, as tensões induzidas por essa variação são as mesmas tensões dispostas nos terminais do equipamento esboçado na figura 2, aplicando a Lei de Faraday [3]:

$$v_1 = e_1 = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (3)$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (4)$$

onde  $\Phi$  é o fluxo instantâneo e  $N_1$  e  $N_2$  correspondem ao número de voltas nos enrolamentos correspondentes. Igualando pela parcela do fluxo na equação (5).

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (5)$$

A razão entre os números de espiras é conhecida como a relação de transformação do equipamento. Finalmente, considerando as análises anteriores tem-se:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} \quad (6)$$

Os transformadores trifásicos podem operar como elevadores ou abaixadores, em outras palavras, eles elevam ou reduzem a corrente de um circuito, de modo que não se altere a potência dele. Esses equipamentos podem ser divididos em dois grupos:

- a. Transformador de potência: são utilizados para gerar, transmitir e distribuir energia, têm potência de 5 MVA até 300 MVA e operam em tensões que podem superar 1000 kV.
- b. Transformador de distribuição: são utilizados para baixar a tensão a ser entregue aos clientes finais das empresas de distribuição de energia. São normalmente instalados em postes ou em câmaras subterrâneas. Possuem potência de 5 kVA a 1000 kVA. Em média tensão tem tensão têm-se de 15 kV ou 36 kV, enquanto em baixa tensão, de 380/220 ou 220/127 V, sendo todos trifásicos.

Transformadores também podem ser utilizados para o casamento de impedâncias. Esse tipo de ligação consiste em modificar o valor da impedância vista pelo lado primário do transformador. Neste caso, são em geral de baixa potência.

### 2.3. Partes Constituintes

Um transformador de potência é constituído basicamente de enrolamentos, núcleo, tanque, radiadores e isolamento. Eles são conhecidos como parte ativa do equipamento, enquanto os demais como acessórios complementares [2].



### **2.3.1. Enrolamentos**

Os enrolamentos são formados por um conjunto de espiras que representa um circuito elétrico associado a uma das tensões do equipamento.

Os condutores são enrolados em forma de bobinas cilíndricas, dispostas axialmente nas colunas do núcleo em ordem crescente de tensão. Bobinas com condutores em paralelo, na direção radial, devem ter transposição, para minimizar as perdas adicionais, e os esforços mecânicos provenientes de curtos-circuitos. Para se formar um enrolamento, muitas bobinas podem ser conectadas em série ou em paralelo. As bobinas desse enrolamento podem ser empilhadas no núcleo alternadamente combinadas com outro enrolamento. Assim, pode-se classificar os enrolamentos como enrolamentos em disco, disco entrelaçado, helicoidal e em camadas [4].

### **2.3.2. Núcleo**

O núcleo apresenta a função de confinar o fluxo magnético que envolve os dois enrolamentos, possibilitando a transferência de potência entre eles. Geralmente é composto por chapas laminadas, para reduzir as perdas provocadas pela indução de correntes parasitas ou de Foucault [4].

O núcleo pode ser constituído de chapas de aço-silício, laminadas a frio, cobertas por película isolante. A laminação a frio, seguida de tratamento térmico, orienta os domínios magnéticos no sentido da laminação, permitindo alcançar altas densidades de fluxo com perdas reduzidas e baixas correntes de magnetização. As chapas são sustentadas por uma estrutura constituída de vigas metálicas, interligadas por tirantes e por faixas de fibra de vidro impregnadas com resina.

O núcleo dos transformadores trifásicos tem, em geral, três colunas. O núcleo de cinco colunas permite uma redução na altura. Nesse caso, as reatâncias de sequência zero e positivas são iguais, como ocorre também nos bancos formados por unidades monofásicas.

### **2.3.3. Tanque**

A principal função do tanque é propiciar um abrigo físico para a parte ativa do transformador, a qual ficará imersa em óleo quando o equipamento estiver totalmente montado. O dimensionamento do tanque tem como objetivo propiciar uma dissipação de calor adequada

junto aos radiadores. O material utilizado na fabricação dos tanques é o aço-carbono e a espessura das chapas definidas em função da distribuição do peso da parte ativa do transformador [6].

#### **2.3.4. Radiadores**

São responsáveis por dissipar o calor gerado pela parte ativa do equipamento quando energizado. Mesmo desconectado de uma carga, o calor é gerado devido à excitação do núcleo e do fluxo magnético, conhecidas como perdas em vazio.

Devido às características físicas do óleo vegetal ser distintas do óleo mineral, o projeto dos radiadores deve ser diferente para ambos. Porém, nos casos em que o projeto continue o mesmo, uma análise deve ser feita com relação ao ciclo de carga que não sejam excedidos os limites de temperatura de operação [7].

#### **2.3.5. Isolação**

A isolação do transformador é constituída, basicamente, de óleo e celulose (papel ou presspan). O óleo tem ainda a função de refrigeração.

Os condutores (cobre ou alumínio) são envolvidos em tiras de papel, que formam o isolamento entre as espiras. Estes são enrolados em cilindros de presspan, que proporcionam fixação mecânica e isolamento entre enrolamentos de fase e entre estes e o núcleo. As tiras de presspan fixadas nesses cilindros, no sentido axial, formam canais de óleo que, além de contribuírem para o isolamento, facilitam a refrigeração.

Barreiras isolantes adicionais (presspan) são, em geral, usadas entre enrolamentos de fases diferentes e entre os enrolamentos, o núcleo e o tanque. Além de sua função isolante, essas barreiras diminuem a espessura dos canais de óleo, o que aumenta a rigidez dielétrica neles. Para evitar o risco de descargas, as barreiras de presspan devem coincidir com superfícies equipotenciais.

### **2.4. Óleo Isolantes**

São compostos líquidos, de baixa viscosidade, destinados à isolação e refrigeração de transformadores, ao transferir o calor gerado por efeito Joule às paredes do tanque. São caracterizados por uma elevada rigidez dielétrica, que, ao impregnar-se nos elementos isolantes,

umenta a capacidade dielétrica destes materiais [6].

O aquecimento da parte ativa de um transformador imerso em um líquido isolante faz com que o fluxo interno de óleo se dê por meio de um efeito termossifão, no qual o óleo tende a se deslocar para a parte superior do tanque. Assim, o óleo fluirá pelos radiadores trocando calor com o ar externo e conseqüentemente refrigerando o fluído isolante. Isso sempre ocorrerá quando o equipamento entrar em operação e o óleo isolante for aquecido. Portanto, quanto melhores forem as características isolantes do fluido, mais econômico será o projeto, permitindo a redução da quantidade de material isolante sólido e as distâncias entre espiras, bobinas, núcleo e partes aterradas.

O óleo deve estar livre de impurezas, tais como umidade, poeiras e outros agentes que afetam o seu poder dielétrico, que não deve ser inferior a 30 kV/mm. Contudo, o tempo provoca um processo de envelhecimento do óleo, que resulta na formação de ácidos prejudiciais aos materiais isolantes do transformador. Assim, com a perda das características isolantes, o óleo vai-se tornando impróprio para o uso em equipamentos elétricos.

A degradação do óleo em transformadores se dá principalmente pela sobrecarga, a qual provoca uma elevação de temperatura, muitas vezes acima dos valores admissíveis. O contato do óleo com o ar ambiente também é um fator de degeneração, ocorrendo quando há a abertura do equipamento para troca de tapes e outros serviços.

A ocorrência de descargas internas nos transformadores pode fazer com que os óleos sofram decomposições moleculares cujo resultado é a formação de outros produtos que, juntos são chamados de borra. Por ter densidade superior ao do óleo, a borra desce para o fundo do tanque do transformador, e pode ser depositada sobre as bobinas do núcleo; e isto promove sérios danos à isolação ao longo do tempo.

A borra é um produto com poder dielétrico baixo, a deposição entre os fios das bobinas pode acarretar a sua absorção pelo material isolante, geralmente papel, que recobre os fios condutores, que facilitam a ocorrência de descargas entre espiras e a conseqüente queima delas. Outro problema é a solidificação das borras nas paredes do tanque do equipamento, que dificultam a transferência do calor gerado para o ambiente externo. A conseqüência imediata é a deterioração da isolação do transformador e queima dos seus enrolamentos.

Portanto, a vida útil de um transformador se baseia em proteger o papel isolante ao ataque da água, dos componentes ácidos e do aquecimento que são gerados da degradação decorrente da alteração das propriedades do óleo isolante, após determinado tempo de operação.

### 2.4.1. Óleo Mineral Isolante (OMI)

O óleo mineral é largamente utilizado como meio isolante em equipamentos como transformadores. Este material é empregado a um longo tempo e a sua popularidade se dá a sua disponibilidade e seu baixo custo, além de ser um excelente meio isolante e de resfriamento.

Obtido por meio da destilação do petróleo em pressão atmosférica, entre as frações de 300 °C a 400°C, este destilado pode ser de origem parafínica ou naftênica. A sua classificação é definida conforme os métodos de refino aos quais é submetido, que podem ser purificação ácido/alcalina, extração seletiva de solventes, desparafinação, purificação por contato com adsorventes e hidrogenação sob pressão. Trata-se de uma mistura de compostos na qual a maioria das moléculas é constituída por carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos) e, em pequenas quantidades, por compostos que apresentam nitrogênio e oxigênio em estrutura.

A caracterização do OMI como parafínico ou naftênico, é, normalmente, realizada segundo os critérios da norma ASTM D 2140 [8], por meio de medidas de viscosidade, densidade, índice de refração e pela correlação entre estes resultados. Alternativamente, a classificação do OMI pode ser realizada com a técnica de espectroscopia na região infravermelho, pela determinação do seu conteúdo parafínico (Cp). Óleos com Cp inferiores a 50% são considerados naftênicos enquanto aqueles com Cp iguais ou superiores a 56% são classificados como parafínicos. Os óleos com valores de Cp entre 50% e 56% são classificados, em geral, como óleos intermediários [8].

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) estabelece as especificações desses dois tipos de óleos minerais isolantes para utilização em transformadores, desde a sua produção até a sua comercialização. Para transformadores em operação, os valores limites de características do óleo isolante são modificados devido ao envelhecimento natural deste em contato com materiais isolantes, ambiente físico e eletromagnético existente.

Durante a operação do transformador, o óleo passa por um processo de envelhecimento, resultante da elevação de sua temperatura, da ação do oxigênio e do seu contato com metais presentes na construção do transformador, como cobre e ferro. Como consequência, ocorre a deterioração das propriedades isolantes do óleo. Além disso, os subprodutos oriundos da degradação do OMI promovem a aceleração do processo degradativo do isolamento sólido e a formação de borra.

No momento em que as propriedades físico-químicas do OMI não mais satisfizerem as condições dielétricas necessária para o funcionamento do equipamento elétrico, ou seja, quando o fluido apresentar muita deterioração oxidativa e térmica, o óleo isolante deverá ser tratado ou

então substituído. Tal prática de substituição ou regeneração é necessário para evitar danos à isolação sólida do transformador, o que provocaria redução da sua vida útil ou até mesmo provocar alguma falha elétrica.

### **2.4.2. Óleo Vegetal Isolante (OVI)**

A necessidade da utilização de fluidos biodegradáveis e com elevados ponto de combustão, aliado ao desenvolvimento sustentável, impulsionou a busca por fontes alternativas ao OMI. Fluidos sintéticos de hidrocarbono, silicone e éster foram introduzidos na segunda metade do século 20, porém limitados aos equipamentos de distribuição. Os ésteres sintéticos, além da característica biodegradável, mas não renovável, não tiveram seu uso consolidado no setor elétrico brasileiro devido ao custo elevado em comparação com o óleo mineral [11].

Existem duas razões principais para se pesquisar fontes naturais alternativas para fluidos isolantes. Primeiro, o óleo mineral do transformador é pouco biodegradável, é um contaminador de solos e recursos hídricos caso haja derramamento. Agências regulamentadoras já chamam atenção para esses fatos e aplicam multas mais severas para tais acidentes, pois muitos transformadores se localizam próximos a áreas povoadas, centros comerciais e cursos de água. Segundo os produtos petrolíferos eventualmente podem ser super utilizados, havendo uma possível escassez em um curto prazo.

Manter as reservas de petróleo é importante para os produtos à base de petróleo como plásticos, produtos farmacêuticos, químicos orgânicos, entre outros. Até que se não descubra uma alternativa de energia economicamente viável, não há substituto imediato para gasolina, combustíveis de aviação e óleos de aquecimento.

Além do viés ecológico, o OVI apresenta uma afinidade maior para umidade do que o OMI, além de um limite de saturação mais elevado e temperaturas maiores de referência permitindo assim, manter o papel de isolação mais seco, diminuição de riscos de incêndio e prolongamento da vida útil.

Cada vez mais a utilização de OVI vem ganhando incentivo governamental para emprego em máquinas elétricas. O uso de óleos vegetais possui também grandes vantagens técnicas e econômicas em longo prazo. Em países como os Estados Unidos, a utilização de OVI ocupa parcela considerável nos transformadores em operação, porém no Brasil ainda não está largamente difundido [11].

Os óleos vegetais são sempre obtidos a partir de grãos, por processos de descortificação, descascamento, trituração, laminação, cozimento, prensagem mecânica ou extração por

solvente. Ao final deste processo, tem-se o óleo bruto. Este óleo passa então pelos processos de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização, e obtém-se o óleo refinado que é comercializado.

### 2.4.3. Condições Operativas

Os modelos disponíveis para a determinação de limites de carregamento de unidades transformadoras levam em conta principalmente as temperaturas internas (óleo e enrolamentos) e a vida útil. As temperaturas internas, que podem ser monitoradas e controladas através de ações externas, dependem das características de projeto, e devem partir dos requisitos estabelecidos pelas normas ABNT NBR 5356/2020 [7], NBR5416 (Aplicação de cargas) [9], das condições climáticas (temperatura ambiente) e do carregamento das unidades [10].

De acordo com o ONS, uma unidade transformadora de potência deve operar com as suas potências nominais, em regime permanente, para toda a faixa operativa de tensão entre fases admissíveis tanto no primário quanto no secundário, respeitando as premissas definidas em estudo elétrico. Portanto, o equipamento deve ser especificado e dimensionado para a vida útil, que é de uma expectativa de 40 anos, estabelecida em regulamento da ANEEL [12] e assim respeitar três situações:

- Carregamento em condição normal de operação;
- Carregamento em condição de emergência de curta duração; e
- Carregamento em condição de emergência de longa duração.

A figura 3 mostra o carregamento através de um ciclo diário, onde o agente deve garantir que a unidade transformadora de potência possa operar por 4 (quatro) horas do seu ciclo diário de carga com 120% do carregamento, por 30 (trinta) minutos do seu ciclo diário de carga com 140% do carregamento e por todo ciclo de carga com 100% do carregamento, durante a vida útil [12].

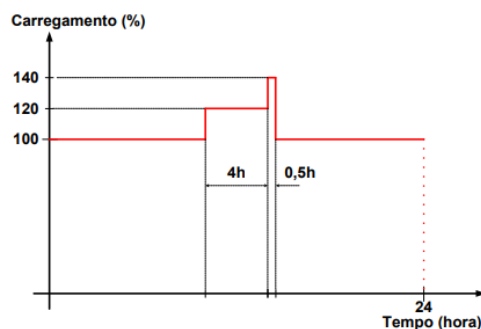


Figura 3 - Ciclo de Carga Diário [12]

## 2.5. Plano de Manutenção

As empresas de geração, transmissão e distribuição que possuem equipamentos com isolamento a óleo devem possuir planos de manutenção normatizados visando a garantia de fornecimento de energia e conservação de equipamentos [13].

A manutenção preditiva consiste em três ações:

- Inspeções visuais;
- Inspeções termográficas nos equipamentos e suas conexões;
- Ensaio do óleo isolante dos equipamentos;

As inspeções visuais devem ser realizadas periodicamente com o objetivo de verificar o estado geral de conservação das subestações, incluindo limpeza dos equipamentos, a qualidade da iluminação do pátio e a adequação dos itens de segurança. Eventos como a existência de vazamentos de óleo, de ferrugem, corrosão e o nível de óleo dos equipamentos são alguns dos fatores a serem observados.

As inspeções termográficas em subestações devem ser realizadas, no mínimo, a cada seis meses, devendo ser avaliadas não apenas as conexões, mas todos os equipamentos da subestação.

Para os ensaios do óleo isolante tem-se as atividades mínimas de manutenção baseadas em:

- Análise dos gases dissolvidos no óleo isolante;
- Ensaio físico-químico do óleo isolante;
- Manutenção preventiva periódica;

A análise dos gases dissolvidos e o ensaio físico-químico do óleo isolante devem ser realizados conforme as normas técnicas específicas e com a periodicidade definida na tabela 1.

Tabela 1 - Atividades Mínimas e Periodicidade [13]

<b>Atividade</b>	<b>Periodicidade Máxima (meses)</b>
Análise de gases dissolvidos no óleo isolante	6
Ensaio físico-químico do óleo isolante	12
Manutenção preventiva periódica	72

A manutenção preventiva periódica de transformadores deve seguir as seguintes atividades:

- Inspeção do estado geral de conservação: limpeza, pintura e corrosão nas partes metálicas;
- Verificação da existência de vazamentos de óleo isolantes;
- Verificação do estado de conservação das vedações;
- Verificação do nível do óleo isolante do tanque principal;
- Verificação do aterramento do tanque principal;
- Verificação do estado de saturação do material secante utilizado na preservação do óleo isolante;
- Verificação do estado de conservação das bolsas e membranas do conservador;
- Verificação dos indicadores de nível do óleo isolante e dos indicadores de temperatura;
- Verificação do funcionamento do sistema de circulação de óleo;
- Verificação do sistema de resfriamento;
- Medição de vibração e ruído de ventiladores e bombas do sistema de resfriamento;
- Verificação do sistema de comutação manual e automática (se existente);
- Verificação do nível do óleo do compartimento do comutador;
- Inspeção da caixa de acionamento motorizado do comutador;
- Inspeção da fiação e das caixas de interligação;
- Ensaio de fator de potência e de capacitância das buchas com derivação capacitiva;

Devido as manutenções preditivas e preventivas realizadas e do número de comutação (em transformadores com comutador em carga) deve ser avaliada a necessidade de realização das seguintes atividades na manutenção preventiva periódica:

- Inspeção interna do comutador;
- Verificação do estado das conexões elétricas do comutador e do sistema de isolamento;
- Verificação do desgaste dos contatos elétricos e troca dos componentes desgastados;
- Ensaio de relação de transformação nos pontos de comutação;
- Verificação do estado do óleo isolante dos comutadores (quando aplicável);



- Verificação do mecanismo de acionamento do comutador;
- Ensaio de fator de potência, de resistência de isolamento e de resistência ôhmica dos enrolamentos.

## **2.6. Comportamento Térmico dos Transformadores**

Os transformadores de potência possuem perdas associadas às suas características construtivas. O aumento de temperatura do equipamento é proporcional às perdas produzidas e inversamente proporcional à superfície de contato entre este e o ambiente externo. Portanto, é importante considerar também o tipo de material da parte ativa e do fluido refrigerante. Assim, quanto maior a carga, maiores são as perdas e conseqüentemente maior a temperatura de operação, sendo assim necessários métodos especiais de resfriamento para manter o equipamento dentro dos níveis térmicos operativos.

As características e propriedades dos materiais isolantes e magnéticos dependem da temperatura de operação. É imprescindível conhecer os limites térmicos de um material e a variação das suas propriedades quando submetidos a valores acima dos limites de temperatura, pois podem acelerar o processo de envelhecimento dos componentes do equipamento, resultantes por parte do óleo da perda da função refrigeradora e da função dielétrica. Nesse processo pode haver a oxidação dos materiais isolantes e a formação de “borra” que se deposita por decantação no fundo do tanque e dos componentes da parte ativa (enrolamentos e núcleo), que prejudicam a isolação e as trocas térmicas.

Assim, devido à relação de temperatura, características dielétricas e envelhecimento do equipamento e conseqüentemente redução da vida útil, são importantes o conhecimento do comportamento térmico do transformador de potência e como as temperaturas estão distribuídas ao longo do equipamento e dos componentes.

### 3. Cálculo Térmico

O cálculo térmico dos transformadores consiste no dimensionamento do sistema de refrigeração utilizado para dissipar o calor proveniente das perdas. Esse sistema deve evitar que as elevações de temperatura nos enrolamentos e no óleo ultrapassem os valores especificados pela norma NBR 5356 [14].

A temperatura máxima admissível no interior dos enrolamentos e no óleo limita a capacidade de um transformador. Um valor excessivo do primeiro produz uma carbonização lenta da isolação em contato com o cobre. Já o óleo quando aquecido acima de certos limites, decompõe-se formando depósitos de reação ácida nos enrolamentos que, ao mesmo tempo, impedem a evacuação do calor e elevam consideravelmente a temperatura interna [15].

Para a dissipação do calor dos enrolamentos e do núcleo, meios como o ar ou o óleo mineral, vegetal ou sintético podem ser utilizados. Quando da utilização de refrigeração a ar, este circula entre as bobinas e o núcleo de maneira natural ou de forma forçada através de ventiladores. Na refrigeração a óleo, o equipamento fica imerso neste líquido, e à medida que o óleo é aquecido, ele deve ser refrigerado através de radiadores que estão em contato externo com o ar ou a água.

A transmissão do calor se realiza por um ou mais dos seguintes modos:

- a) Condução: a partir do centro do núcleo e dos enrolamentos até as superfícies, em contato com o meio, refrigerando, que pode ser o ar ou o óleo que também operam como dielétricos na isolação, através das paredes dos tanques e das paredes dos radiadores;
- b) Convecção: das superfícies externas do núcleo e dos enrolamentos ao fluído isolante e refrigerante; do líquido isolante às paredes internas do tanque e dos radiadores; das paredes externas do tanque e dos radiadores ao ar ambiente ou outro meio de refrigeração que já não necessita mais ter a propriedade de isolante elétrico, como por exemplo, a água;
- c) Radiação: das paredes externas do tanque e dos radiadores ao ar; das superfícies externa do núcleo e dos enrolamentos ao fluído isolante.

Nos transformadores imersos em óleo, este, em contato com as superfícies externas do núcleo e das bobinas, é aquecido e pelo efeito termossifão, sobe. Ao mesmo tempo, o óleo, em contato com as paredes mais frias da caixa e dos radiadores, desce. Forma-se então uma circulação natural do óleo no interior da caixa e nos radiadores. O óleo serve, portanto, de veículo para transportar o calor das bobinas e núcleo até as paredes mais frias da caixa e dos

radiadores onde é refrigerado indiretamente pelo ar externo [14].

### 3.1. Sistemas de Refrigeração para Transformadores Imersos em Óleo

#### 3.1.1. ONAN: Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Natural

O óleo circula naturalmente pelo efeito termossifão, conduzindo o calor aos radiadores que refrigeram através do ar que circula naturalmente através dos radiadores e paredes do tanque como mostrado na figura 4.

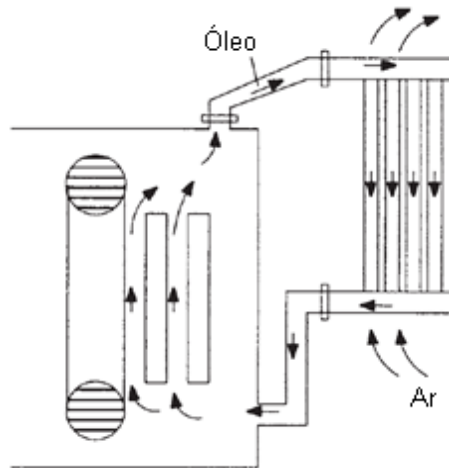


Figura 4 - Refrigeração Oil Natural Air Natural (ONAN)[16]

O aumento da temperatura do óleo provoca a sua dilatação, que só é possível devido a uma camada de ar ou outro gás inerte e seco acima do óleo, sem que a pressão interna aumente demasiadamente. Esse é um sistema normalmente utilizado em pequenos transformadores de distribuição imersos em óleo.

Para transformadores maiores, o uso de um conservador permite a dilatação do óleo livremente. O nível do óleo no conservador varia com a temperatura do óleo e, através de um tubo, pode “respirar” o ar externo através de um sistema de secagem com sílica gel.

Em transformadores de média e alta potência e com tensões mais elevadas, esta “respiração” se realiza com uma bolsa de borracha dentro do conservador, de modo que o óleo não tem contato direto com o ar. Com esse sistema, o aumento da temperatura do óleo não produz aumento de pressão dentro do tanque. A pressão hidrostática do nível mais elevado do óleo no servador garante que eventuais defeitos de selagem da tampa e de outros acessórios não sejam fontes de contaminação do óleo, com a entrada de ar úmido devido uma diminuição da

pressão interna da caixa pelo abaixamento da temperatura [16].

Para transformadores de distribuição, o sistema de radiadores pode ser muito simples, com a utilização de pequenos dutos salientes ao tanque ou o sistema com caixa ondulada que aumenta muito a superfície de refrigeração da própria caixa.

### **3.1.2. ONAF: Óleo com Circulação Natural e Ar com Circulação Forçada.**

Em um sistema de refrigeração ONAF são instalados ventiladores para forçar o ar através dos radiadores. Os ventiladores podem ser colocados nas laterais, como na figura 5, ou embaixo dos radiadores. Caso colocados nas laterais, o resfriamento é mais eficiente se instalados na parte superior onde a temperatura do óleo é maior.



Figura 5 - Resfriamento Oil Natural Air Forced (ONAF)

### **3.1.3. OFAN ou OFAF: Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Natural, ou, Óleo com Circulação Forçada e Ar com Circulação Forçada.**

Neste sistema o óleo circula com maior vazão devido à instalação de uma bomba de óleo que aumenta a vazão do óleo no sentido da circulação natural, como representado pelo esquema da figura 6. Adicionalmente podem ser instalados ventiladores para forçar a circulação de ar através dos radiadores.

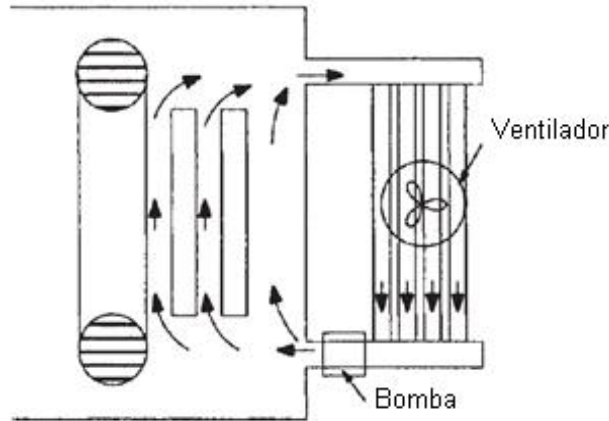


Figura 6 - Resfriamento Oil Forced Air Forced (OFAF)[16]

### 3.1.4. OFWF: Óleo com Circulação Forçada e Água (Water) com Circulação Forçada.

Nesse caso o sistema de refrigeração possui circulação forçada do óleo através da parte ativa do transformador e com circulação forçada da água utilizada para refrigerar os radiadores tubulares. A água entra pela parte superior dos radiadores onde o óleo é mais quente e, portanto, o gradiente de temperatura óleo-água é maior, o que aumenta a eficiência da troca térmica.

Essa sigla para os sistemas de refrigeração de transformadores em óleo é praticamente universal. Definições mais completas da classificação dos métodos de resfriamento se encontram na NBR 5356-2/2020 [18].

## 3.2. Limites de Elevação de Temperatura

Utilizando a norma NBR 5356-2/2020 [18] prescreve os limites de elevação da temperatura dos enrolamentos, do óleo e das partes metálicas dos transformadores projetados para funcionamento nas condições normais da temperatura do meio de resfriamento, da altitude, da tensão de alimentação, da corrente de carga e do fluxo de potência, conforme mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de Elevação de Temperatura °C - NBR 5356-2/2020 [18].

Sistema de preservação de óleo	<i>Limites de elevação de temperatura °C <sup>a</sup></i>					
	Dos enrolamentos			Do topo do óleo	Das partes metálicas	
	Média, por medição da variação de resistência		Do ponto mais quente <sup>e</sup>		Em contato com a isolamento sólida ou adjacente a elas	Não em contato com a isolamento sólida e não adjacente a elas
	Circulação do óleo natural ou forçada sem fluxo de óleo dirigido	Circulação forçada de óleo com fluxo dirigido <sup>f</sup>				
Sem conservador e sem gás inerte sob pressão	55 95 <sup>g</sup>	60 100 <sup>g</sup>	65 120 <sup>g</sup>	50 <sup>b</sup> 60 <sup>g</sup>	Não devem atingir temperaturas superiores à classe térmica do material da isolamento-adjacente ou em contato com estas	A temperatura não deve atingir valores que venham a danificar componentes ou materiais adjacentes
Com conservador ou com gás inerte sob pressão	55 65 <sup>d</sup> 95 <sup>g</sup>	60 70 <sup>d</sup> 100 <sup>g</sup>	65 80 <sup>d</sup> 120 <sup>g</sup>	55 <sup>c</sup> 65 <sup>d</sup> 65 <sup>g</sup>		

<sup>a</sup> Os materiais isolantes devem ser adequados, de acordo com a ABNT NBR 7034, ao limite de elevação de temperatura em que o transformador é enquadrado.

<sup>b</sup> Medida próxima à superfície do óleo.

<sup>c</sup> Medida próxima à parte superior do tanque, quando tiver conservador, e próxima à superfície do óleo, no caso de gás inerte.

<sup>d</sup> Para esse limite de temperatura, quando é utilizada isolamento de papel, este deve ser termoestabilizado.

<sup>e</sup> A verificação de temperatura do ponto mais quente é feita mediante acordo entre o fabricante e o comprador.

<sup>f</sup> O método de verificação do fluxo de óleo forçado dirigido constitui objeto de acordo entre o fabricante e o comprador.

<sup>g</sup> Estes limites de elevação de temperatura são aplicáveis, desde que acordado entre fabricante e comprador. Neste caso, deve ser utilizado o sistema híbrido de isolamento composto por isolantes sólidos à base de aramida ou similares (Classe C), apenas onde necessários (adjacentes aos condutores dos enrolamentos), e isolantes sólidos à base de celulose onde a temperatura máxima não ultrapasse os 120°C, imersos em óleo mineral isolante, com base na IEEE Std. 1276:1997

As elevações de temperatura das diversas partes do transformador em relação à temperatura do ambiente em que está instalado.

À medida que crescem as potências unitárias dos transformadores, crescem as

dificuldades em se dissipar as perdas a fim de manter os gradientes de temperatura especificado em norma. Isso pode ser facilmente explicado, uma vez que as perdas são proporcionais aos volumes das partes ativas do transformador, que são o núcleo e as bobinas, e a dissipação do calor gerado é proporcional às superfícies. Ou seja, as perdas a serem dissipadas por unidade de área de dissipação crescem com a potência do transformador e mais difícil se torna a refrigeração, exigindo o desenvolvimento dos diferentes métodos de resfriamento como descritos acima.

### 3.3. A Distribuição da Temperatura em um Transformador

A temperatura do óleo, dada na tabela 2, é medida próximo à superfície do óleo ou próximo à tampa da caixa, quando é um conservador. A partir desta leitura, se deduz o valor da temperatura ambiente e assim obtém-se a elevação da temperatura do óleo sobre o ambiente. As temperaturas dos enrolamentos são medidas por variação da resistência elétrica e, portanto, correspondem ao valor médio da temperatura dos enrolamentos [14].

A figura 6 indica a distribuição da temperatura do óleo, no sentido vertical, de um transformador com circulação natural do óleo através dos radiadores.

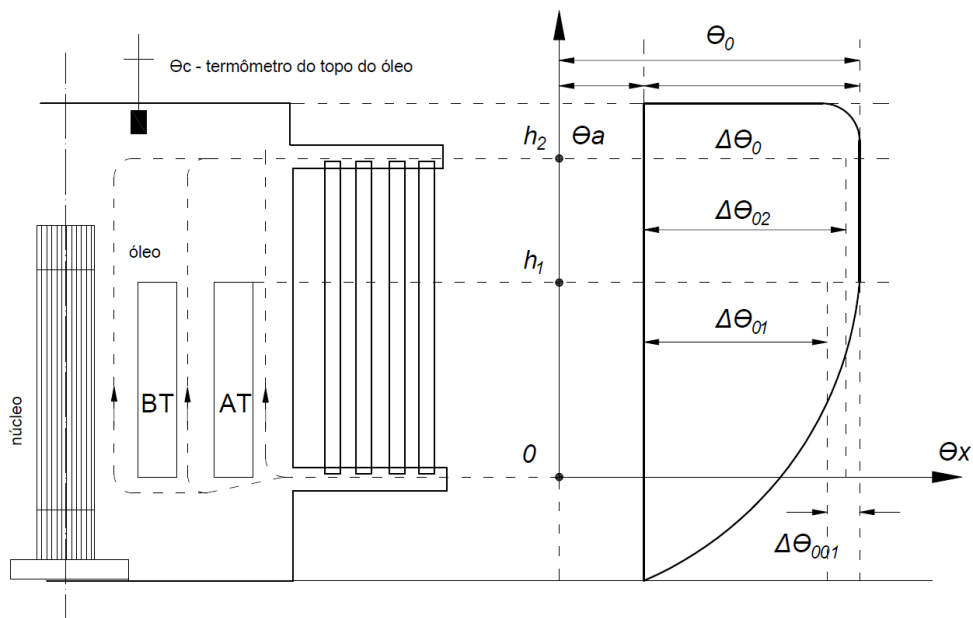


Figura 7 - Distribuição da Temperatura do Transformador Verticalmente [14].  
Onde em °C:

- $\theta_0$  = temperatura máxima do óleo, denominada de temperatura de topo e medida na parte superior do óleo;
- $\theta_a$  = temperatura média do ambiente;

- $\theta_C$  = temperatura média do cobre medida por variação de resistência;
- $\theta_{01}$  = temperatura média do óleo para a altura “ $h_1$ ” das bobinas;
- $\theta_{02}$  = temperatura média do óleo para a altura “ $h_2$ ” dos radiadores;
- $\Delta\theta_0 = \theta_0 - \theta_a$  = elevação da temperatura máxima do óleo;
- $\Delta\theta_{01} = \theta_{01} - \theta_a$  = elevação da temperatura média do óleo para “ $h_1$ ”;
- $\Delta\theta_{02} = \theta_{02} - \theta_a$  = elevação da temperatura média do óleo para “ $h_2$ ”;
- $\Delta\theta_{ca} = \theta_c - \theta_a$  = elevação da temperatura média do cobre dos enrolamentos;
- $\Delta\theta_{C01} = \Delta\theta_C - \Delta\theta_{01}$  = diferença de temperatura entre o óleo médio para a altura “ $h_1$ ” e o cobre dos enrolamentos;
- $\Delta\theta_{001} = \Delta\theta_0 - \Delta\theta_{01}$  = diferença de temperatura entre o óleo máximo e o óleo médio para a altura “ $h_1$ ”.

$$\Delta\theta_{01} \frac{1}{h_1} \int_0^{h_1} \Delta\theta_{0x} dx \quad (07)$$

$$\Delta\theta_{02} \frac{1}{h_2} \int_0^{h_2} \Delta\theta_{0x} dx \quad (08)$$

A tomada inferior dos radiadores é feita na altura do extremo inferior dos enrolamentos e a tomada superior é feita na parte mais elevada da caixa nos transformadores com conservador. Nos transformadores sem conservador, portanto com uma camada de gás inerte ou ar seco na parte superior à tomada dos tubos radiadores é feita de modo que o nível de óleo, para uma temperatura de 25°C, fique no meio da secção do tubo.

A temperatura do óleo abaixo dos enrolamentos é relativamente baixa e tem pouca participação na dissipação do calor. O óleo aquecido pelas perdas no núcleo e bobinas sobe por efeito termossifão ao passo que nos radiadores, onde ele é resfriado, ele tende a descer, o que forma uma circulação natural do óleo. Também a superfície externa da caixa participa com a dissipação de calor, principalmente nas partes não cobertas por radiadores.

A determinação da elevação de temperatura dos enrolamentos é dada pela equação (09), na qual “ $\Delta\theta_{C01}$ ” é calculado em função das perdas no condutor (cobre ou alumínio), e “ $\Delta\theta_0$ ” é limitado pelas normas em uso e medida diretamente durante o ensaio de aquecimento do transformador. O valor de “ $\Delta\theta_{001}$ ” é dado pela equação (10).



$$\Delta\theta_{ca} = \Delta\theta_{c01} + \Delta\theta_{01} = \Delta\theta_{c01} - \Delta\theta_{001} + \Delta\theta_0 \quad (09)$$

$$\Delta\theta_{001} = (0,20 \dots \dots \dots 0,25)\Delta\theta_0 \quad (10)$$

O cálculo da dissipação do calor do tanque e dos radiadores é realizado em função da temperatura média do óleo para a altura “ $h_2$ ”, dada pela equação (11), para uma relação “ $h_1/h_2$ ”, dada pela equação (12).

$$\Delta\theta_{02} = (0,87 \dots \dots \dots 0,91)\Delta\theta_0 \quad (11)$$

$$0,4 < \frac{h_1}{h_2} < 0,55 \quad (12)$$

Entre o óleo na altura “ $h_2$ ” e a parede externa da caixa ou dos radiadores tem-se, ademais, uma queda de temperatura resultante da troca de calor por convecção “ $\Delta\theta_{opi}$ ”, entre o óleo e a parede interna, e por condução “ $\Delta\theta_{pipe}$ ”, entre parede interna e parede externa, cuja soma varia de 5 °C a 7 °C, conforme mostram a equação (13) e a figura 07.

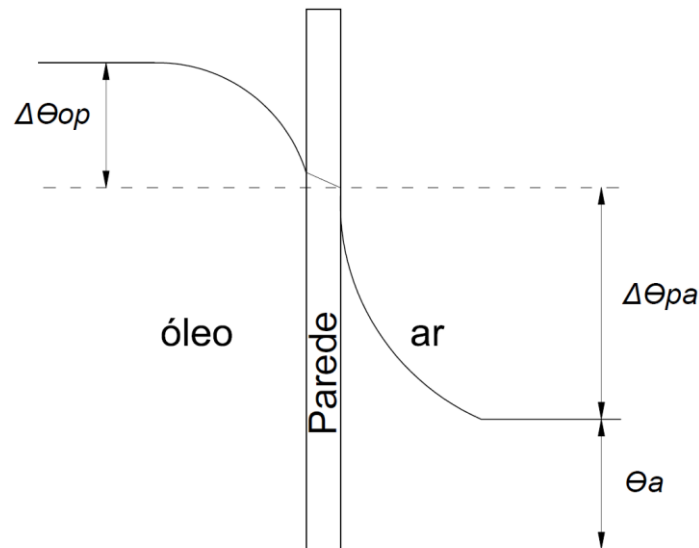


Figura 8 - Diagrama das Temperaturas na Transmissão de Calor pela Parede da Caixa do Transformador [14].

$$\Delta\theta_{op} = \Delta\theta_{opi} - \Delta\theta_{pipe} = (5 \dots \dots \dots 7)^\circ\text{C} \quad (13)$$

O salto de temperatura médio entre paredes externas (caixas e radiadores) e o ar é dado, portanto, pela equação (14).

$$\Delta\theta_{pa} = \Delta\theta_{02} - \theta_{0p} \quad (14)$$

A Tabela 3 mostra a gama de variação dos diferentes saltos de temperatura para transformadores sem e com conservador. Estes valores são orientativos no projeto térmico dos transformadores.

Tabela 3 - Gama de Variação nos Diversos Saltos de Temperatura [14]

	<i>Transformador sem Conservador</i>	<i>Transformador com Conservador</i>
	°C	°C
$\Delta\theta_0$	50,0	50,0
$\Delta\theta_{CA}$	50,0	50,0
$\Delta\theta_{02}$	43,5 a 45,5	48,0 a 50,0
$\Delta\theta_{01}$	37,5 a 40,0	41,0 a 44,0
$\Delta\theta_{001}$	10,0 a 12,5	11,0 a 14,0
$\Delta\theta_{CO1}$	15,0 a 17,5	11,0 a 14,0
$\Delta\theta_{PA}$	36,5 a 40,5	41,0 a 45,0

Se os saltos de temperatura entre o condutor e o óleo médio para altura  $h_1$  resultarem maiores do que os valores especificados na tabela 3, então a elevação máxima de temperatura do óleo, na equação (03), deverá ser menor do que as permitidas por norma a fim de que a elevação da temperatura do condutor não ultrapasse os valores de norma. O abaixamento da temperatura máxima do óleo é conseguido mediante um aumento dos radiadores ou então utilizando uma ventilação forçada neles. Do mesmo modo, uma circulação forçada do óleo, através dos radiadores e tanque, aumenta a eficiência da refrigeração. Por vezes, o meio refrigerante utilizado é a água que refrigera o óleo em trocadores de calor água-óleo.

### 3.4. A Transmissão de Calor por Condução

#### 3.4.1. Entre Paredes Planas

Na figura 9, tem-se o caso da condução do calor entre paredes planas com diferentes temperaturas. O salto de temperatura entre faces paralelas é dado pela equação 15.

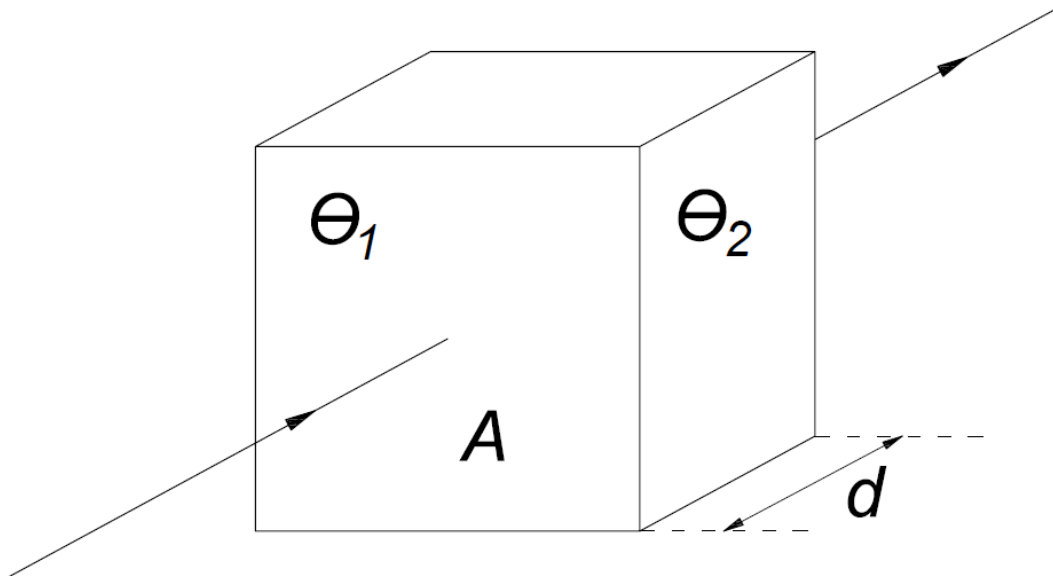


Figura 9 - Condução do Calor entre Paredes Planas [14]

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{d}{\lambda} \cdot \frac{W}{A} \quad (15)$$

Onde:

- $A$  = área da parede ( $m^2$ );
- $d$  = espessura da parede (m);
- $W$  = energia calorífica por segundo transmitida através da parede expressa em watts;
- $\lambda$  = coeficiente de condutividade térmica em watts/m.°C.

A tabela 4 fornece o valor da condutividade térmica de alguns materiais utilizados na construção de transformadores. As chapas de ferro silício que compõem o núcleo do transformador apresentam uma condutividade térmica bem menor no sentido perpendicular à largura das chapas como se pode ver pelos valores de “ $\lambda$ ” da tabela 4. Neste caso, tem-se uma configuração de placas paralelas atuando como fonte de calor no transformador.

Tabela 4 - Coeficiente de condutividade Térmica de Alguns Materiais [14]

<b>Material</b>	<b><math>\lambda</math> (W/m°C)</b>
Cobre eletrolítico	380
Alumínio	220
Ferro	50
Ferro-silício (3% Si) laminado a frio	2,8 *
Ferro-silício (3% Si) laminado a frio	21 **
Papel Kraft 0,1 mm (impregnado com óleo)	0,10
Papel Kraft 0,1 mm (seco)	0,20
Papel Kraft 0,06 mm (impregnado com óleo)	0,15
Presspahn (seco)	0,18
Presspahn (impregnado com óleo)	0,25
Papelão Weidmann	0,25
Porcelana	1,60
Ar	0,03 repouso
Óleo de transformador	0,125 repouso

\* no sentido da espessura \*\* no sentido da largura

### 3.4.2. Placas Paralelas que são Fontes de Calor

- a) Pacote de placas isolado termicamente em um dos lados.

A figura 10 mostra o exemplo da transmissão de calor através de um pacote de placas que são fontes de calor, como ocorre no núcleo do transformador ou em um enrolamento em forma de camadas.

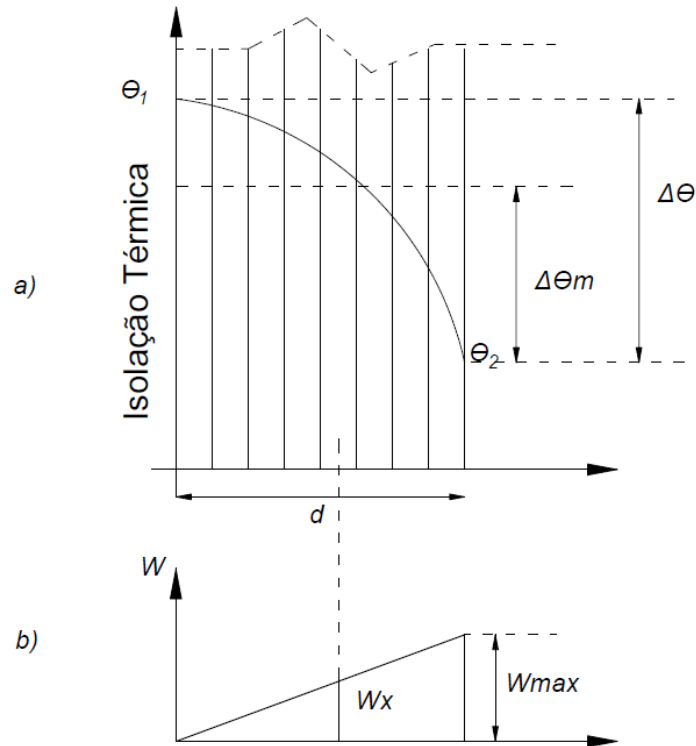


Figura 10 - a) Distribuição da Temperatura b) Distribuição da Potência [14]

Onde:

- $\Theta_1$  = temperatura da face isolada;
- $\Theta_2$  = temperatura da face refrigerada;
- $\Delta\Theta$  = diferença de temperatura entre as faces;
- $\Delta\Theta_m$  = diferença de temperatura entre a média com a face refrigerada;
- $d$  = somatória da largura das placas;
- $W_{max}$  = Potência Calorífica Máxima;
- $W_x$  = Potência Calorífica no ponto escolhido  $x$ ;

Neste exemplo, o pacote está isolado termicamente num dos lados, de modo que todo o calor gerado é dissipado pelo lado não isolado. A potência calorífica que é transmitida por condução cresce linearmente desde a face isolada até a face livre, como mostra a equação (16). A potência média no ponto  $x$  é, portanto, dada pela equação (17). A diferença de temperatura entre a face isolada e a superfície situada a uma distância “ $x$ ” é dada pela equação (18) que é derivada da equação (15).

$$W_x = \frac{W_{max}}{d} x \quad (16)$$

$$W_{x \text{ médio}} = \frac{W_x}{2} \quad (17)$$

$$\theta_1 - \theta_x = \frac{W_x \cdot x}{2A \cdot \lambda} = \frac{W_{max}}{2d \cdot A \cdot \lambda} x^2 \quad (18)$$

Substituindo-se na equação (18) o valor de “x” por “d”, obtém-se a diferença de temperatura entre a face isolada à esquerda e a face refrigerada à direita, dada pela equação (19).

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{W_{max} \cdot d}{2A \cdot \lambda} \quad (19)$$

Se o pacote de placas da figura 11 for, por exemplo, camadas de um enrolamento produzindo perdas, então a temperatura deste enrolamento é determinada pela variação da resistência elétrica com a temperatura. Nesse caso, a temperatura medida é a temperatura média do pacote e será, portanto, dada pela equação (20). Isso significa que a temperatura na face isolada termicamente é 50% maior do que a temperatura média medida [16].

$$\Delta\theta_m = \Delta\theta - \frac{1}{d} \int_0^d \frac{W_{max}}{2d \cdot A \cdot \lambda} x^2 dx = \frac{2}{3} \Delta\theta \quad (20)$$

b) Pacote de placas paralelas que dissipa calor em ambos as faces.

Se na figura 10 a parede isolante fosse um espelho imaginário, obter-se-ia a figura 11, e a equação (21) daria a diferença de temperatura entre o centro do pacote e as superfícies externas. A temperatura média continua sendo dada pela equação (20).

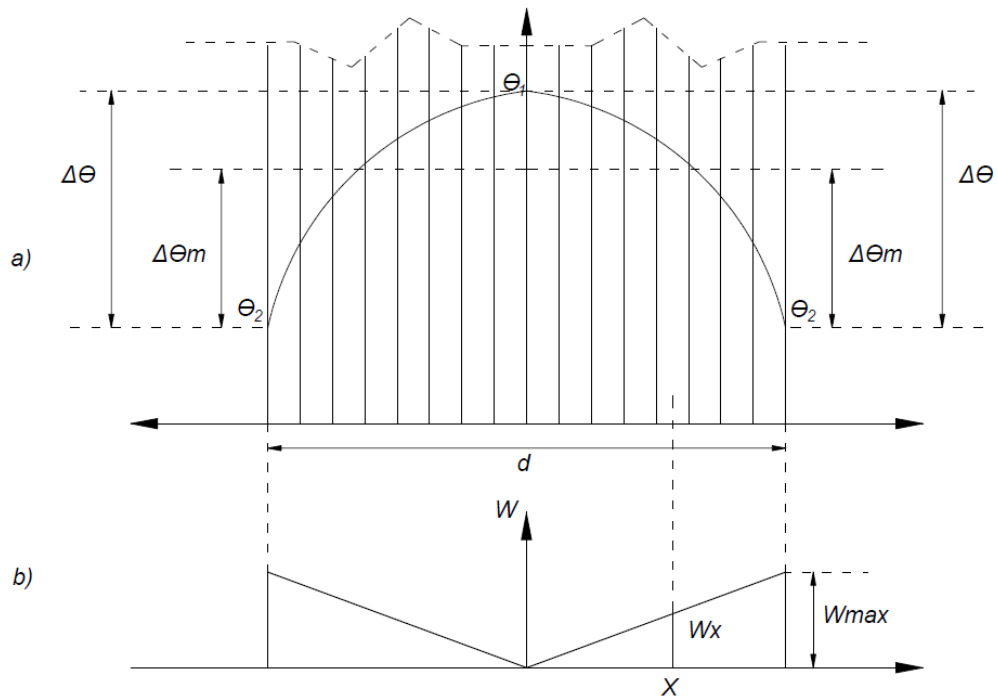


Figura 11 - a) Distribuição da Temperatura b) Distribuição da Potência Calorífica [14]

$$\theta_1 - \theta_x = \Delta\theta = \frac{W_{max} \cdot \frac{d}{2}}{2A \cdot \lambda} = \frac{W_{max} \cdot d}{4A \cdot \lambda} \quad (21)$$

São exemplos também deste caso os enrolamentos em camadas e os pacotes de chapas que formam o núcleo do transformador, porém com dissipação de calor para os dois lados. No caso particular de lâminas do núcleo, é no centro do núcleo que a temperatura é mais elevada. Para chapas de ferro silício, com espessuras de 0,35 mm e isolamento de “carlite” entre camadas e pressionadas com 5 kgf/cm<sup>2</sup>, tem-se um coeficiente de condutibilidade térmica  $\lambda=2,8$  no sentido perpendicular às lâminas, e  $\lambda=21$  no sentido longitudinal. Vê-se assim que a refrigeração nos topos das chapas é mais eficiente do que nas partes planas das chapas externas [14].

- c) Condutores isolados que são fontes de calor, formando pacote isolado em um dos lados.

Nos enrolamentos em camadas com condutores retangulares isolados com papel Kraft, como está representado nas figuras 12 e 13, pode-se considerar uniforme a temperatura no condutor em presença da forte diferença de temperatura que ocorre na isolação.

A isolação entre camadas pode ser simplesmente a dupla-isolação dos condutores ou pode ser uma isolação constituída pela introdução de uma camada isolante complementar. A

isolação da superfície externa pode ser simples do condutor ou uma isolação diferente com espessura também diferente. De um modo geral, tem-se:

- $\delta$  = espessura da isolação entre placas (camadas);
- $\delta'$  = espessura da isolação da superfície externa;
- $\lambda$  = coeficiente de condutividade térmica da isolação entre placas;
- $\lambda'$  = coeficiente de condutividade térmica da isolação da superfície externa;
- $n$  = número de camadas.

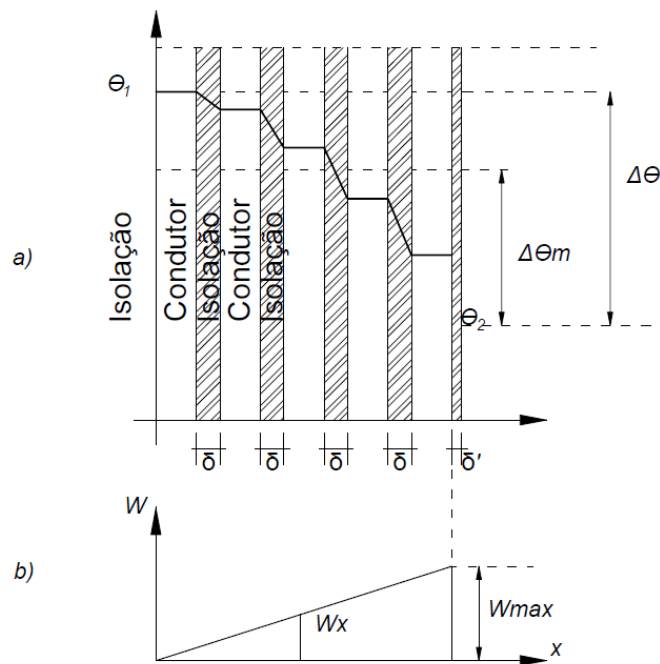


Figura 12 - a) Distribuição de Temperatura b) Distribuição da Potência Calorífica [14]

Considerando desprezível a queda de temperatura no condutor em relação à queda na isolação, a queda de temperatura total é dada pela equação (22) e a temperatura média pela equação (23).

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \left[ \frac{\delta}{\lambda} \left( \frac{n-1}{2} \right) + \frac{\delta'}{\lambda'} \right] \frac{W_{max}}{A} \quad (22)$$

$$\Delta\theta_m = \left[ \frac{\delta}{\lambda} \left( \frac{n-1,5}{3} + \frac{1}{6n} \right) + \frac{\delta'}{\lambda'} \right] \frac{W_{max}}{A} \quad (23)$$

Para o caso comum em que se tem  $\lambda=\lambda'$  e  $\delta'=\delta/2$  resulta a equação (24) para o salto de



temperatura e a equação (25) para o salto médio de temperatura.

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{n \cdot \delta}{2\lambda} \frac{W_{max}}{A} \quad (24)$$

$$\Delta\theta_m = \left( \frac{2}{3} + \frac{2}{6n^2} \right) \Delta\theta \quad (25)$$

- d) Condutores isolados que são fontes de calor, formando pacote com dissipação de calor nas duas faces externas.

Por imagem especular do caso anterior, obtém-se as expressões (26) e (27) para o salto de temperatura máximo e o médio. Para o caso em que se tem  $\lambda = \lambda'$  e  $\delta' = \delta/2$ , resultam as expressões (28) e (29), sendo “n” o número total de placas ou camadas.

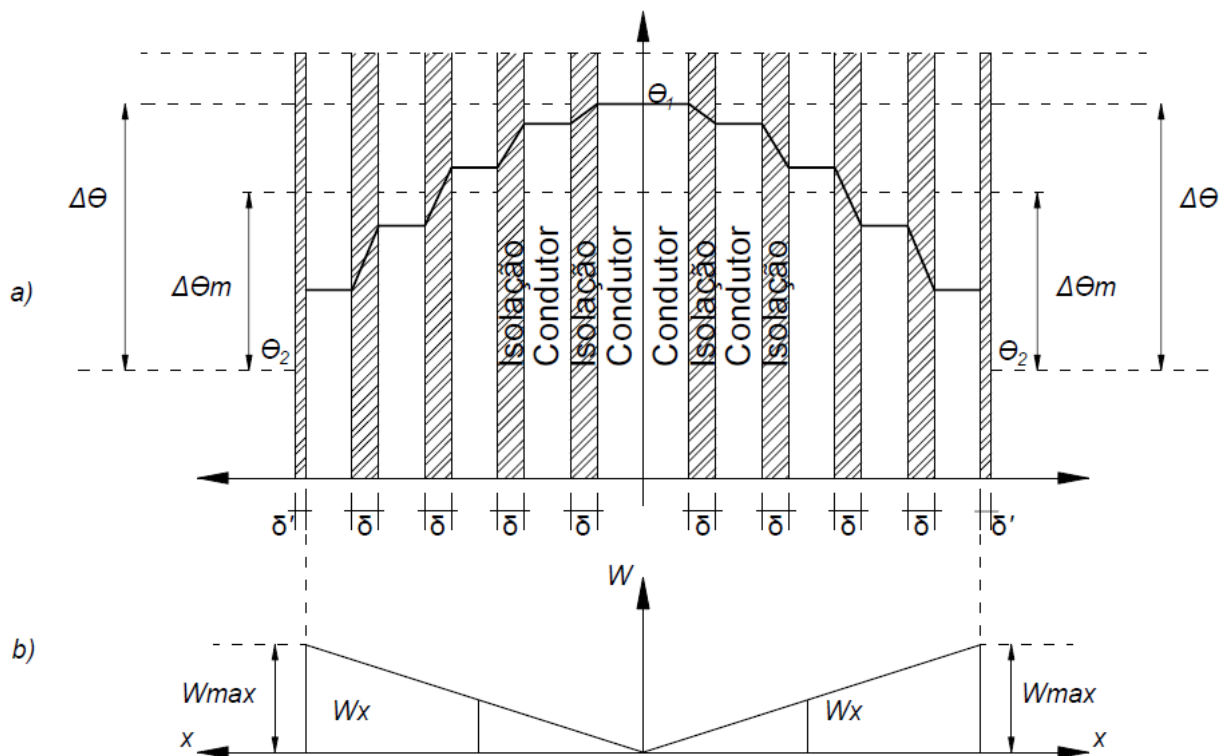


Figura 13 - a) Distribuição de Temperatura b) Distribuição da Potência Calorífica [14]

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{1}{2} \left[ \frac{\delta}{\lambda} \left( \frac{n-1}{2} \right) + \frac{\delta'}{\lambda'} \right] \frac{W_{max}}{A} \quad (26)$$

$$\Delta\theta_m = \left[ \frac{\delta}{\lambda} \left( \frac{n-1,5}{3} + \frac{1}{6n} \right) + \frac{\delta'}{\lambda'} \right] \frac{W_{max}}{A} \quad (27)$$

$$\theta_1 - \theta_2 = \Delta\theta = \frac{n \cdot \delta}{4\lambda} \frac{W_{max}}{A} \quad (28)$$

$$\Delta\theta_m = \left( \frac{2}{3} + \frac{4}{3n^2} \right) \Delta\theta \quad (29)$$

Nas expressões (26), (27), (28) e (29) se “ $W_{max}$ ” é a perda total, então a superfície de dissipação de calor “ $A$ ” é a área das duas faces laterais.

### 3.5. A Transmissão de Calor por Convecção

A convecção é a transmissão de calor que se realiza entre uma superfície sólida e um fluido, líquido ou gasoso que está em contato. As trocas de calor se verificam numa fina camada do gás ou líquido que banha a superfície sólida. Quando o fluido refrigerante é o ar, a película atuante é da ordem de 12 mm a 15 mm de espessura e quando é o óleo, a película é de aproximadamente 3 mm.

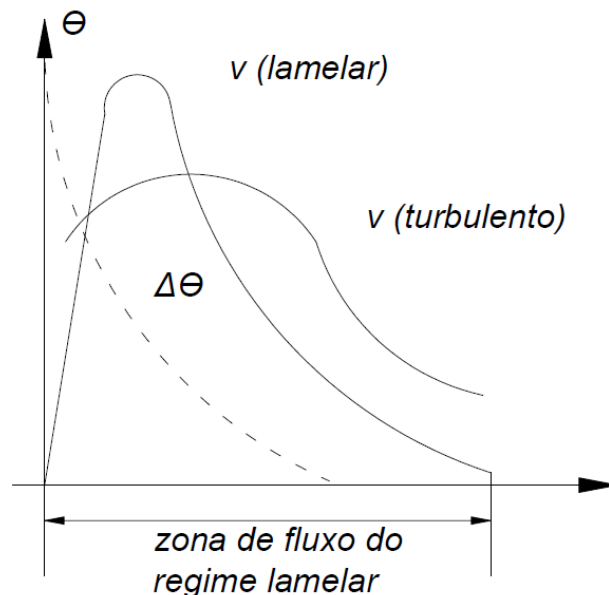


Figura 14 - Elevação de Temperatura e Velocidade nas Zonas de Circulação de Fluido [14]

Na figura 14, pode-se ver como varia a temperatura do fluido em função do afastamento da superfície quente e como varia a velocidade do fluido na película atuante da convecção, no regime lamelar e no regime turbulento. Quanto a superfície sólida é mais quente do que o fluido,

este se aquece e sobe, caso contrário, ele se esfria e desce ao longo da superfície.

Considerando-se a espessura da película atuante na convecção, pode-se concluir que canais de óleo com espessuras superiores de 6 mm a 8 mm entre duas superfícies quentes paralelas não influem mais na refrigeração.

Em paredes verticais, como nas bobinas de transformadores de força e de distribuição, tem-se sempre um regime turbulento nas partes superiores. Nos radiadores tubulares, prevalece o regime lamelar ao longo de toda a altura dos tubos.

A potência térmica dissipada ou transferida por convecção é dada pela equação (30), sendo a temperatura ambiente, do meio fluido, gás ou líquido, a temperatura fora da zona de regime lamelar, como mostra a figura 13. A temperatura da superfície sólida é a sua temperatura média, pois ela não se mantém constante no sentido vertical.

$$W = \alpha_c \cdot \Delta\theta \cdot A \quad (30)$$

Onde:

- $\alpha_c$  = coeficiente de convecção ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ );
- $\Delta\theta$  = salto de temperatura entre superfície quente e ambiente;
- $A$  = área lambida pelo fluido refrigerante.

O coeficiente de convecção “ $\alpha_c$ ” depende do salto de temperatura “ $\Delta\theta$ ”, da temperatura ambiente do fluido ( $\theta_2$  °C ou  $T_2$  °C), da pressão barométrica “B”, em mm de Hg para os gases, e da viscosidade para os líquidos.

Assim, para o ar como meio fluido e no caso de convecção natural em paredes verticais, tem-se a equação (31).

$$\alpha_c \cong 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta} \cdot \sqrt{\frac{293}{T_2}} \cdot \sqrt{\frac{B}{760}} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (31)$$

Nas condições normais de  $\theta_2 = 20$  °C ( $T_2 = 293$  K) e  $B = 760$  mm de Hg, resulta em:

$$\alpha_c \cong 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (32)$$

Para superfícies quentes horizontais em que o ar pode se deslocar livremente para cima, o coeficiente de convecção é 20% maior. No entanto, se o ar for impedido de deslocar-se

verticalmente e devendo se deslocar no sentido horizontal, então o coeficiente de convecção é menor.

Para o óleo como fluido e no caso de uma convecção natural em paredes verticais, tem-se a equação (33), sendo “ $\theta_1$ ” a temperatura média da superfície. Esta temperatura média pode ser mais quente do que o óleo ou mais fria. No caso da transmissão de calor do cobre para o óleo, a temperatura média da superfície é mais alta. Se for o óleo que está transmitindo calor à superfície, como no caso da transmissão de calor do óleo para as paredes internas da caixa ou dos radiadores, então a superfície é mais fria.

$$\alpha_{\infty} \cong 38 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta} \cdot \sqrt{\frac{\theta_1}{50}} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (33)$$

Para uma elevação de temperatura da parede quente, de 65 °C, e uma temperatura ambiente de 20°C, resulta uma temperatura média da superfície de  $\theta_1 = 20 + 65 = 85$  °C. Nesse caso, o coeficiente de convecção da parede quente para o óleo é dado pela equação (34).

$$\alpha_{\infty} \cong 50 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (34)$$

Observando as expressões (32) e (34), pode-se concluir que o óleo refrigera cerca de 20 vezes mais do que o ar.

No caso de canais de óleo formados por superfícies quentes horizontais, como nos enrolamentos em disco, o fluxo de circulação do óleo é dificultado, pois, neste caso, o coeficiente de convecção é 50% menor para uma relação de “1:10” entre a espessura e o comprimento do canal de óleo.

Nos enrolamentos e nas colunas do núcleo dos transformadores, normalmente 25% a 30% da superfície externa, está coberta por distanciadores (longarinas ou estecas). Assim, somente 70% a 75% da superfície externa da bobina ou núcleo constituem a superfície útil na transmissão de calor por convecção.

Pelas expressões (32), (33) e (34), verifica-se que, para um valor constante de “ $\theta_1$ ”, as potências térmicas ou as perdas variam com a potência 1,25 do salto de temperatura de onde se podem escrever as expressões (35) e (36).

$$\frac{W_1}{W_2} = \left( \frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} \right)^{1,25} \quad (35)$$

$$\frac{\Delta\theta_1}{\Delta\theta_2} = \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{0,8} \quad (36)$$

Portanto, determinado o salto de temperatura “ $\Delta\theta_2$ ” para uma perda térmica “ $W_2$ ”, pode-se determinar o salto de temperatura “ $\Delta\theta_1$ ” para uma perda térmica “ $W_1$ ” com a equação (36). A equação (36) é aplicada dentro de certos limites de influência da variação da temperatura “ $\theta_1$ ”, na equação (29), e somente para o caso de uma convecção natural, isto é, sem forçar a circulação do fluido. Essa conclusão é aplicada diretamente no ensaio de aquecimento de transformadores quando, por algum motivo, não for possível aplicar todas as perdas (100% das perdas) para o ensaio.

### 3.6. A Transmissão de Calor por Radiação

Todos os corpos com temperaturas acima de zero absoluto irradiam energia térmica como mostrado na figura 15. Segundo a lei de Stefan-Boltzman, a radiação térmica do “corpo negro” é dada pela equação (37), em que:

- A = área em m<sup>2</sup> do corpo negro;
- T = Temperatura do corpo negro em K;
- $\sigma = 5,77$  que é a constante de radiação do corpo negro;
- $\varepsilon$  = emissividade do corpo cujo valor está compreendido entre 0 e 1 ( $\varepsilon \leq 1$ ).

$$W = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (\text{watts}) \quad (37)$$

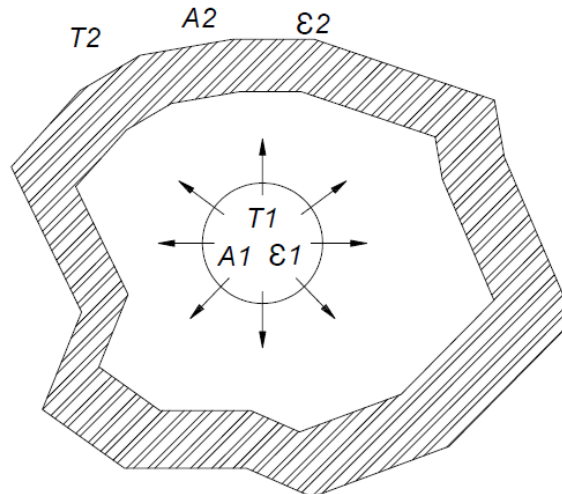


Figura 15 - T transmissão de Calor por Radiação:  $T_1 > T_2$  [14]

A figura 16 mostra um corpo sólido, com uma temperatura “ $T_1$ ”, que é envolvido por um outro a uma temperatura  $T_2 < T_1$ . Ambos irradiam calor, mas a resultante se dá no sentido da temperatura maior para a menor e a potência térmica é dada pela equação (38).

$$W = \sigma \cdot F_A \cdot F_E \cdot A_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{watts}) \quad (38)$$

“ $F_A$ ” é o fator de visão que considera o ângulo sólido médio sob o qual uma superfície “vê” a outra, ou seja, é o fator que representa a troca direta de radiação, sem levar em conta a energia refletida por outras superfícies.

“ $F_E$ ” é um fator que depende das emissividades individuais “ $\epsilon_1$ ” e “ $\epsilon_2$ ” e das relações das áreas “ $A_1$ ” e “ $A_2$ ” das superfícies irradiante e receptora. Assim, para o caso da figura 14, tem-se:

$$F_A = 1$$

$$F_E \cong \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} \quad (39)$$

Se  $A_2 \gg A_1$  tem-se  $F_E \approx \epsilon_1$ . Se  $A_1 = A_2$  e as paredes são paralelas, então:

$$F_E \cong \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (40)$$

Para todos os demais casos, tem-se:

- $F_E \cong \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ , sempre que as emissividades não sejam muito menores do que “1”.

Para as superfícies pintadas de transformadores, normalmente, a emissividade “ $\varepsilon_1$ ” é de cerca 0,93 e para os ambientes envolventes “ $\varepsilon_2$ ” é de aproximadamente 0,95. Tomando-se uma relação de áreas  $A_1/A_2$ , compreendida entre 0 e 1, o valor médio de “ $F_E$ ” será 0,915. Como a constante de radiação do corpo negro é de 5,77, escreve-se a equação (41) para determinar a potência de radiação.

$$W = 5,3 \cdot A_1 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad (\text{watts}) \quad (41)$$

No entanto, para o cálculo da refrigeração, é conveniente definir um “coeficiente de radiação” tal como se define o coeficiente de convecção. Desse modo, escreve-se para a radiação uma equação semelhante à equação (32), escrita para a convecção. Obtém-se, assim, a equação (42) em que o coeficiente de radiação é dado pela equação (43).

$$W = \alpha_r \cdot A \cdot (T_1 - T_2) = \alpha_r \cdot \Delta\theta_r \cdot A \quad (42)$$

$$\alpha_r = 5,3 \frac{\left( \frac{T_1 + \Delta\theta}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{\Delta\theta} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (43)$$

O coeficiente de radiação “ $\alpha_r$ ” cresce com o valor da temperatura “ $T_2$ ” e com o salto de temperatura  $\Delta\theta = T_1 - T_2$ . Para temperaturas ambiente em torno de  $\theta_2 = 20^\circ C$  ( $T_2 = 293 K$ ) e saltos de  $20^\circ C$  a  $100^\circ C$ , obtém-se o coeficiente de radiação pela equação (44).

$$\alpha_r \cong 2,65 \cdot \sqrt[4]{\Delta\theta} \quad (W/m^2 \cdot ^\circ C) \quad (44)$$

As expressões (32), (34) e (44) mostram que o coeficiente de convecção (para o ar e o óleo) e o coeficiente de radiação são dados por expressões semelhantes. Admitindo-se, na equação (33), que a temperatura média “ $\theta_1$ ” da superfície de separação seja de  $20^\circ C + 45^\circ C = 65^\circ C$ , resulta a equação (45).

$$\alpha_{co} = 43,2 \sqrt[4]{\Delta\theta} \quad (45)$$

Com esta simplificação, tem-se na tabela 5 os coeficientes de convecção, para o óleo e

para o ar, e o coeficiente de radiação em função dos saltos de temperatura, considerando que:

O coeficiente de convecção para o óleo se refere a uma temperatura média, da superfície, de 65 °C;

O coeficiente de convecção para o ar se refere a uma temperatura do ar de 20 °C e uma pressão de 760 mmHg;

O coeficiente de radiação se refere a uma temperatura ambiente de 20 °C.

Tabela 5 - Coeficientes de Convecção e radiação [14]

<b>Salto Temp.</b>	<b>Óleo</b>	<b>Ar</b>	
$\Delta\theta$ °C	$\alpha_{co}$	$\alpha_{ca}$	$\alpha_r$
5	65,0	3,74	5,43
10	77,0	4,45	5,56
15	85,5	4,92	5,73
20	91,5	5,28	5,90
30	104,0	5,87	6,15
40	112,0	6,29	6,50
50	118,0	6,64	6,88
60	123,0	6,95	7,16

### 3.7. Aplicação

A principal aplicação desse capítulo é demonstrar como os mecanismos de transmissão de calor funcionam nos transformadores de potência para o entendimento de como se dá a distribuição de temperatura neste e em suas partes constituintes.

Além disso, é mostrado como os sistemas de controle de refrigeração ajudam os transformadores de potência não ultrapassarem os limites determinados por norma, evitando a aceleração da sua deterioração como um todo. A demonstração matemática não é utilizada no estudo de caso, mas é importante para uma análise crítica dos resultados, levando em conta como estão distribuídas as variáveis térmicas no equipamento.



## 4. Regressão Linear

A análise de regressão estuda a relação entre uma variável dependente e outras variáveis conhecidas como independentes. Essa relação pode ser descrita por um modelo matemático, ou seja, por uma equação que associa a variável dependente às variáveis independentes. Este modelo é designado por modelo de regressão linear simples se define uma relação linear entre a variável dependente e uma variável independente. Assim, uma vez que forem incorporadas várias independentes, o modelo passa a denominar-se modelo de regressão linear múltipla [20].

### 4.1. Modelo de Regressão Linear Simples

A análise de relação linear entre duas variáveis é representada pela regressão linear simples. Assim, a relação entre as duas variáveis pode ser ilustrada por uma função linear, o que causa uma relação direta de causa e efeito.

Seja  $n$  pares de duas variáveis,  $X_i$ ,  $Y_i$  (com  $i = 1, 2, \dots, n$ ), se  $Y$  é função linear de  $X$ , estabelece-se uma regressão linear simples, que é representado pela equação (46):

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + u_i \quad (46)$$

Onde:

- $Y$  é a variável dependente (efeito);
- $\alpha$  é o intercepto em  $Y$ , ou seja, é o valor esperado de  $Y$  quando  $X=0$ ;
- $\beta$  é a inclinação ou taxa de mudança;
- $X$  é a variável independente (causa);
- $u$  é um erro aleatório, onde se procuram incluir as influências no comportamento da variável  $Y$  que não podem ser explicadas linearmente.

Para o modelo de regressão linear simples, tem-se:

1.  $X$  e  $Y$  tem relação linear;
2.  $X$  não é uma variável aleatória;
3. A média do erro é nula, ou seja,  $E(u_i) = 0$ ;
4. Para um dado valor de  $X$ , a variância do erro  $u$  é sempre  $\sigma^2$ , denominada variância residual, isto é,

$$E(u_i^2) = \sigma^2 \quad (47)$$

ou

$$E[Y_i - E(Y_i|X_i)]^2 = \sigma^2 \quad (48)$$

5. O erro de uma observação é não-correlacionado com o erro em outra observação, isto é,  $E(u_i u_j) = 0$  para  $i \neq j$ .
6. Os erros têm distribuição normal.

Assim, pode-se escrever que:

$$u_i \sim N(0, \sigma^2) \quad (49)$$

O número de observações disponíveis deve ser maior do que o número de parâmetros da equação de regressão. Para ajustar uma regressão linear simples deve-se ter, no mínimo, 3 observações, pois caso se disponha de 2 observações (2 pontos), a reta é um problema de geometria analítica, não existindo a possibilidade de fazer nenhuma análise estatística.

É necessário demonstrar que as estimativas dos parâmetros obtidas pelo método dos mínimos quadrados são não-tendenciosas ou imparciais, assim tem-se:

$$E(a) = \alpha \quad (50)$$

e

$$E(b) = \beta \quad (51)$$

onde  $a$  e  $b$  são as estimativas de mínimos quadrados de  $\alpha$  e  $\beta$ , respectivamente.

As afirmações 1, 2 e 3 permitem escrever:

$$E(Y_i) = \alpha + \beta X_i \quad (52)$$

Se os pares  $X_i, Y_i$  foram originados de amostragem aleatória, garante-se a independência entre observações. Se, além disso, a esperança do erro é igual a zero, temos, com  $i \neq j$ ,

$$E(u_i u_j) = E(u_i) \cdot E(u_j) = 0 \quad (53)$$

A afirmação 6 é necessária para que as distribuições de  $t$  e de  $F$  para testar hipóteses a

respeito dos valores dos parâmetros ou construir intervalos de confiança. É possível justificar essa afirmação com base no teorema do limite central.

Esse teorema estabelece que a soma de muitas variáveis aleatórias independentes tem distribuição aproximadamente normal, desde que nenhuma delas seja dominante. O erro ( $u_i$ ) do modelo estatístico de uma regressão linear é à influência das variáveis que afetam a variável dependente, mas que não foram consideradas no modelo e caso essas variáveis forem de menor importância, os seus efeitos no modelo devem ser relativamente pequenos. [19].

Para a estimativa dos parâmetros da análise de regressão as estimativas  $a$  e  $b$  dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  da regressão devem ser obtidas. Essas estimativas são determinadas a partir de  $n$  valores de observações de  $X_i$ ,  $Y_i$  (com  $i = 1, 2, \dots, n$ ), obtemos, então:

$$\hat{Y}_i = a + bX_i \quad (54)$$

onde  $\hat{Y}_i$ ,  $a$  e  $b$  são, respectivamente estimativas de  $E(Y_i) = \alpha + \beta X_i$ ,  $\alpha$  e  $\beta$ .

Para cada par de valores  $X_i$ ,  $Y_i$  podemos estabelecer o desvio:

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i = Y_i - (a + bX_i) \quad (55)$$

O método dos mínimos quadrados adota como estimativas dos parâmetros os valores que minimizam a soma dos quadrados dos desvios

$$Z = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n [Y_i - (a + bX_i)]^2 \quad (56)$$

A função  $Z$  terá mínimo quando suas derivadas parciais em relação a “ $a$ ” e “ $b$ ” forem nulas:

$$\frac{\partial Z}{\partial a} = -2 \sum [Y_i - (a + bX_i)] = 0 \quad (57)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial b} = 2 \sum [Y_i - (a + bX_i)](-X_i) = 0 \quad (58)$$

Por se tratar de uma soma de quadrados de desvios, o ponto extremo será necessariamente um ponto de mínimo da função. Formalmente, pode-se verificar que as

condições de segunda ordem para mínimo são satisfeitas.

Simplificando-se as equações (57) e (58), tem-se o sistema de equações normais:

$$\begin{cases} na + b \sum X_i = \sum Y_i & (59) \\ a \sum X_i + b \sum X_i^2 = \sum X_i Y_i & (60) \end{cases}$$

Para o sistema resolvido, tem-se:

$$a = \frac{(\sum X^2)(\sum Y) - (\sum X)(\sum XY)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (61)$$

$$b = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \quad (62)$$

Na prática determina-se “b” primeiro, e da equação (59) tem-se:

$$a = \frac{\sum Y}{n} - b \frac{\sum X}{n} \quad (63)$$

ou

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (64)$$

## 4.2. Modelo de Regressão Linear Múltipla

A partir do conceito de regressão linear simples, se a análise se ampliar para duas ou mais variáveis independentes o modelo agora se denomina regressão linear múltipla [20]. Assim, pode-se modelar para k variáveis independentes de acordo com a equação (65).

$$Y_j = \alpha + \beta_1 X_{1j} + \beta_2 X_{2j} + \dots + \beta_k X_{kj} + u_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (65)$$

Ou de forma simplificada como na equação (66).

$$Y_j = \alpha + \sum_{i=1}^k \beta_i X_{ij} + u_j \quad (66)$$

A notação matricial o modelo fica escrita de acordo com a equação (67):

$$y = X\beta + u \quad (67)$$

onde:

$$y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \cdots & X_{k1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \cdots & X_{k2} \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \cdots & X_{kn} \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} \quad (71)$$

De acordo com as afirmações tomadas a seguir:

1. Seja a variável dependente ( $D_j$ ) função linear das variáveis independentes escolhidas, sendo  $k$  o número de variáveis ( $X_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, k$ );
2. A escolha do número das variáveis independentes deve ser fixos e não variar durante as observações;
3.  $E(u_j)=0$ , ou seja,  $E(u) = 0$ , adota-se 0 como um vetor de zeros;
4. Os erros devem ser homocedásticos, isto é,  $E(u_j^2) = \sigma^2$ ;
5. Os erros não podem ser correlacionados entre si, isto é,  $E(u_j u_h) = 0$  para  $j \neq h$ ;
6. Os erros devem ter distribuição normal.

Combinando as afirmações de número 4 e 5 tem-se a equação (72).

$$E(uu') = I\sigma^2 \quad (72)$$

É importante observar que caso o número dos parâmetros a serem estimados seja de  $p = k + 1$  ( $\alpha, \beta_1, \dots, \beta_k$ ), deve-se fazer um número de observações maior que  $p$ , pois caso contrário a determinação dos parâmetros será um problema matemático de um sistema de  $p$  equações com  $p$  incógnitas, e não é possível fazer qualquer análise estatística. Portanto, o número de observações do sistema que se quer utilizar a regressão linear múltipla deve ser de  $n > p$ .

Como na regressão linear simples, as afirmações 1, 2 e 3 são respeitadas para mostrar que os estimadores de mínimos quadrados são possuem tendências; e as cinco primeiras afirmações permitem demonstrar que tais estimadores são lineares não-tendenciosos de variância mínima. A afirmação 6 é utilizada para fazer os testes de hipótese e para determinar os intervalos de confiança para os parâmetros [21].

Em função do método dos mínimos quadrados para fazer a estimativa dos parâmetros, seja o vetor dos parâmetros definido como  $b$  e o vetor dos desvios  $e$ , tem-se:

$$b = \begin{bmatrix} a \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} \quad (73)$$

e

$$e = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} \quad (74)$$

Pode-se escrever a equação (75) e (76).

$$y = Xb + e = \hat{y} + e \quad (75)$$

e

$$e = y - Xb + e = y - \hat{y} \quad (76)$$

onde

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_1 \\ \hat{Y}_2 \\ \vdots \\ \hat{Y}_n \end{bmatrix} \quad (77)$$

A soma dos quadrados dos desvios é dada pela equação (78).

$$Z = e'e = (y' - b'X')(y - Xb) = y'y - y'Xb - b'X'y + b'X'Xb \quad (78)$$

As matrizes  $y'Xb$  e  $b'X'y$  são iguais, devido uma ser a transposta da outra e cada uma tem apenas um elemento. Então pode-se reescrever de acordo com a equação (79):

$$Z = y'y - 2b'X'y + b'X'Xb \quad (79)$$

A função da equação (79) denominada de  $Z$  apresenta ponto de mínimo para os valores de  $b$  que tornem sua diferencial identicamente nula, ou seja, ao se aplicar a ferramenta de diferencial:

$$dZ = -2(db')X'y + (db')X'Xb + b'X'X(db) \equiv 0 \quad (80)$$

Como  $(db')X'Xb = b'X'X(db)$  são matrizes com apenas um elemento e uma é transposta da outra, escreve-se a equação (81) e (82):

$$-2(db')X'y + 2(db')X'Xb \equiv 0 \quad (81)$$

ou

$$(db')(X'Xb - X'y) \equiv 0 \quad (82)$$

Portanto, pode-se identificar a diferencial de  $Z$  como nula para:

$$X'Xb = X'y \quad (83)$$

que é o sistema de equações normais.

Se  $X'X$  é não singular, existe a matriz inversa  $(X'X)^{-1}$ . Ao se multiplicar os dois membros de (83) por  $(X'X)^{-1}$ , obtém-se:

$$b = (X'X)^{-1}X'y \quad (84)$$

Para a obtenção das estimativas dos parâmetros é necessário a construção das matrizes

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum X_{1j} & \sum X_{2j} & \cdots & \sum X_{kj} \\ \sum X_{1j} & \sum X_{1j}^2 & \sum X_{1j}X_{2j} & \cdots & \sum X_{1j}X_{kj} \\ \sum X_{2j} & \sum X_{1j}X_{2j} & \sum X_{2j}^2 & \cdots & \sum X_{2j}X_{kj} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum X_{kj} & \sum X_{1j}X_{kj} & \sum X_{2j}X_{kj} & \cdots & \sum X_{kj}^2 \end{bmatrix} \quad (85)$$

$$X'y = \begin{bmatrix} \sum Y_j \\ \sum X_{1j}Y_j \\ \sum X_{2j}Y_j \\ \vdots \\ \sum X_{kj}Y_j \end{bmatrix} \quad (86)$$

Do sistema de equações normais pode-se obter outros resultados de interesse. De (83) segue-se que

$$X'y - X'Xb = 0 \quad (87)$$

onde 0 é um vetor de elementos onde todos são iguais a zero. Então:

$$X'(y - Xb) = 0 \quad (88)$$



ou

$$X'e = 0 \quad (89)$$

essa relação matricial significa que

$$\sum e_j = 0 \quad (90)$$

e

$$\sum X_{ij}e_{ij} = 0 \text{ para } i = 1, \dots, k \quad (91)$$

A soma dos desvios (90) é nula de acordo com o fato de o modelo ter um termo constante ( $\alpha$ ), o que faz com que a primeira coluna de X seja um vetor com todos os elementos iguais a 1.

Ao ser nula a soma dos desvios, então:

$$\sum Y_j = \sum \hat{Y}_j \quad (92)$$

O vetor  $b = (X'X)^{-1}X'y$  é um estimador não-tendencioso de  $\beta$ . Substituindo (67) em (84). Tem-se a equação (93):

$$b = (X'X)^{-1}X'(X\beta + u) \quad (93)$$

ou

$$b = \beta + (X'X)^{-1}X'u \quad (94)$$

Ao utilizar as afirmações 2 e 3:

$$E(b) = \beta \quad (95)$$

### 4.3. Aplicação

No capítulo 4 foi demonstrada a teoria de Regressão Linear, apresentada inicialmente a Regressão Linear Simples, onde apenas uma variável independente é utilizada. A aplicação desse modelo é válida quando ela tem relação de linearidade com a variável dependente, ou quando não se tem outras para serem observadas. Um grande problema nessa abordagem é a não representatividade por completo do sistema real.

Em seguida foi apresentada a Regressão Linear Múltipla, cujo equacionamento para essa modelagem representa um “plano de um sistema tridimensional de coordenadas ou plano de regressão”. Ou seja, quando se utiliza mais variáveis independentes obtém-se, caso elas tenham relação com a variável dependente, uma representação mais fiel do sistema estudado.

Sendo assim, para os estudos de simulação para o caso escolhido será utilizado apenas o método de Regressão Linear Múltipla, partindo da premissa de que as variáveis a serem escolhidas tem que ter correlação entre elas.

## 5. Modelagem de um Estudo de Caso

A modelagem de um caso se baseia no fluxograma da figura 16, onde o processo se inicia com a medição de parâmetros dos equipamentos de pátio. O sistema supervisor do Centro de Operações monitora todas as medidas configuradas em todas as subestações em que ela opera, em outras palavras, todas as medidas analógicas (tensão, corrente, potência ativa, temperatura, ...) e as medidas digitais (estado do disjuntor, estado da seccionadora, alarmes de equipamentos, atuações de proteção, ...) de todas as subestações operadas por um Centro são reunidas, direcionadas e armazenadas nas suas máquinas.

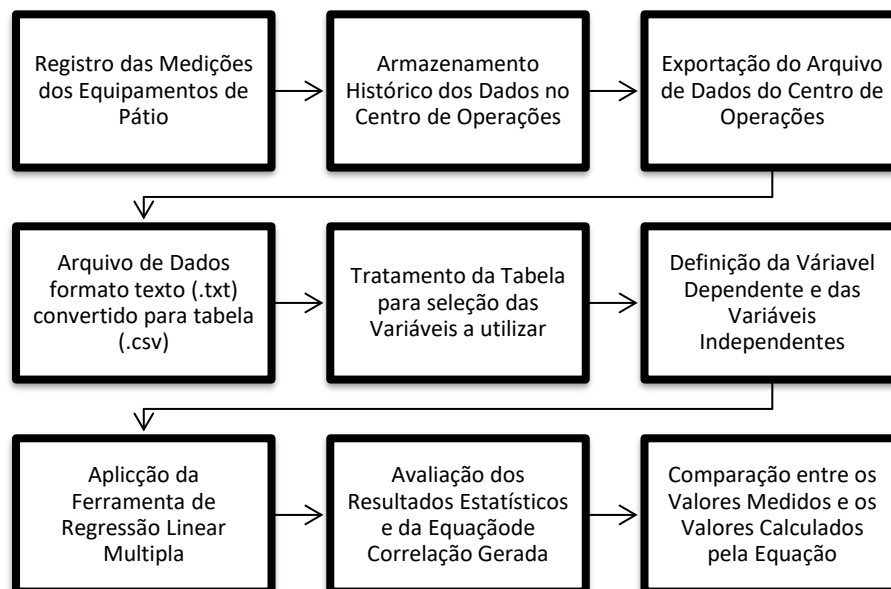


Figura 16 - Fluxograma de Trabalho para a Modelagem

Essas medidas são armazenadas historicamente em arquivos diários e salvos automaticamente nos computadores dos supervisórios. Porém, alguns tipos diferentes de armazenamentos são feitos pelo sistema, ou seja, para medidas analógicas, as quais são registradas a cada intervalo de tempo predefinido, é criado um registro. Por outro lado, os eventos de pontos digitais salvos em outros arquivos de logs de eventos, esses valores são binários (Disjuntor Aberto, Disjuntor Fechado, Relé de Gás Operado ou Relé de Gás Normal) e somente são registrados em condição de mudança, isso faz sentido para evitar a repetição das mesmas informações.

Para a modelagem do estudo de caso somente o arquivo de medições analógicas é utilizado. Ele é gerado diariamente, assim de acordo com a janela de observações, dias de

observação, a quantidade de arquivos que serão exportados do sistema supervisorio é definida.

Eles possuem formatação de tipo texto, o que dificulta a sua utilização e o seu tratamento na hora de aplicar técnicas matemáticas de estatística. Por esse motivo, os arquivos em formato texto são convertidos em tipo tabela. Assim, depois de convertidos em tabelas de medição analógicas é necessário fazer um tratamento desses dados, pois como dito anteriormente, ele possui todas as medições analógicas de todos os equipamentos de todas as subestações operadas pelo centro.

Tem-se que fazer a seleção e criação de uma tabela auxiliar que compreenderá somente as variáveis de interesse. Para não se selecionar medições erradas de equipamentos de subestações diferentes, um cuidado deve ser tomado, pois pode-se ter equipamentos com nomes iguais, porém em lugares diferentes, por exemplo, TR1 (Transformador 1) da Subestação X e TR1 (Transformador 1) da Subestação Y. Esse problema é fácil de ser evitado, pois todas as medidas são nomeadas com um padrão geralmente adotado por cada empresa, onde cada sigla é composta por nome da instalação, variável medida e unidade.

Definidas as variáveis de interesse, o próximo passo é a escolha da variável dependente e da quantidade de variáveis independentes, as quais serão estudadas a correlação entre elas através da Regressão. A relevância desta etapa está na medida ser observada. Isso por causa da relação com as outras variáveis a serem testadas. Observa-se através do teste de significância global F gerado no processo de regressão, caso o valor seja menor que 0,05, significa que existe correlação entre a variável independente escolhida e a variável dependente estudada.

Essa etapa de certa forma é, inicialmente, experimental, ou seja, de acordo com o que se quer observar as outras variáveis devem ser escolhidas para ver o grau de relação. Em alguns casos, a variável independente pode não possuir relação forte com a dependente, e é descartada da equação.

O próximo passo da modelagem consiste na aplicação da Regressão Linear Múltipla. Neste trabalho foi utilizado o software EXCEL<sup>®</sup>, pela facilidade de trabalho em tabelas e por possuir aplicativos de estatística já desenvolvido, porém nada impede que o observador utilize outra ferramenta para as observações.

Aplicada a Regressão Linear Múltipla, uma tabela de resultados é gerada pelo programa, assim é possível saber se a escolha das observações foi válida. Mesmo que uma variável independente tenha forte correlação com a dependente, a janela de observação é de extrema importância na análise, pois quanto maior for o número de dados, melhor e mais verdadeiro vai ser o resultado.

Finalmente, sendo satisfatórios os dados estatísticos gerados pela Regressão Linear

Múltipla, uma equação de correlação é construída e aplicada a todos os pontos de observação antes utilizados pela análise. Assim é feito o cálculo da variável dependente em cada ponto e comparado com o valor medido no mesmo instante para comparação visual dos resultados e assim é finalizado a modelagem do caso.

O método é flexível, ou seja, as interações podem ser testadas com diversas escolhas para estudo de correlação. Mesmo após a seleção das variáveis independentes, elas podem ser acrescentadas de mais outras ou até mesmo diminuídas de acordo com o interesse de estudo, assim como pode-se mudar a variável dependente a ser estudada.

A modelagem das trocas térmicas dos transformadores de potência tem o objetivo de possibilitar um maior fator de carregamento no equipamento sem comprometer a vida útil [22]. Voltadas a subsidiar os projetos de equipamentos e seus limites térmicos de operação, estas pesquisas preocupam-se exclusivamente com o fluxo térmico interno (por condução e convecção). Objetivam, ainda, uma melhor avaliação do comportamento da temperatura crítica ou *HotSpot* a partir das medições da temperatura do óleo e da imagem térmica [23].

Para a modelagem de um estudo da metodologia de regressão linear múltipla foi utilizado um transformador com dados de placa disponíveis no Anexo A. As principais informações deste transformador são dadas na Tabela 6:

Tabela 6 - Principais Dados do Transformador Modelado

<b><i>Características Principais do Equipamento</i></b>	
Nº de Fases	3
Tipo	ATOVC-NF
Potência	90/120/150 MVA
Tensão	230-138-13,8 kV
Frequência	60 Hz
Ligação do Banco	Estrela-Estrela-Triângulo
Tipo de resfriamento	ONAN/ONAF/ONAF
Tipo de comutação	Sob Carga (CDC) e sem tensão (CST)
Normas de referência	ABNT/NBR 5356
Massa total (com óleo)	149.000 kg
Massa p/ Transporte sem óleo	87.000 kg
Massa de óleo	48.000 kg
Volume de óleo	54.200 litros

Os Centros de Operações das concessionárias aquisitam as informações em tempo real através de um sistema supervisorio como o SAGE, software desenvolvido pela CEPTEL [24]. Esses dados são armazenados em arquivos pelo SAGE, sendo alguns deles divididos de acordo com o tipo de dado a ser colhido, alguns deles são armazenados nos logs, outros são alarmes e alguns são os pontos analógicos, esses últimos são de importância para a utilização na análise

das variáveis de temperatura e potência do transformador. O esquema básico de tráfego de informações é demonstrado na figura 17.

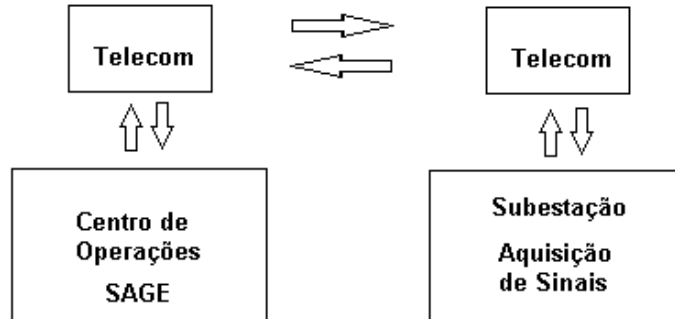


Figura 17 - Esquema de Aquisição de Dados

Nesse estudo alguns valores foram selecionados através dos arquivos de analógicos gerados pelo SAGE. Eles são produzidos diariamente com coleta a cada 5 minutos das medidas de todas as variáveis armazenadas de todos os equipamentos da subestação como demonstrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Medições das Variáveis Observadas – Parte das Observações

<i>TEMPO</i>	<i>TF1_TOL E (°C)</i>	<i>TF1- POT (MW)</i>	<i>Tamb (°C)</i>	<i>TF1_TE_Médio (°C)</i>	<i>TF1_TEA T (°C)</i>	<i>TF1_TEB T (°C)</i>	<i>LAG_TF1_TEM T (°C)</i>
18/10/20 0:00	32,80	22,01	12,70	33,60	33,95	33,04	33,80
18/10/20 0:05	32,82	21,76	12,70	33,46	33,95	32,84	33,60
18/10/20 0:10	32,63	20,66	12,70	33,40	33,75	32,84	33,60
18/10/20 0:15	32,63	20,03	12,70	33,21	33,55	32,65	33,42
18/10/20 0:20	32,63	19,80	12,70	33,21	33,55	32,65	33,42
18/10/20 0:25	32,63	19,46	12,70	33,21	33,55	32,65	33,42
18/10/20 0:30	32,43	18,00	12,70	33,08	33,37	32,65	33,22
18/10/20 0:35	32,43	16,38	12,70	33,02	33,37	32,65	33,03
18/10/20 0:40	32,45	16,23	12,70	33,02	33,37	32,65	33,03
18/10/20 0:45	32,43	14,78	12,70	32,95	33,17	32,65	33,03
18/10/20 0:50	32,43	14,52	12,70	32,95	33,17	32,65	33,03
18/10/20 0:55	32,43	14,50	12,70	32,95	33,17	32,65	33,03

Após a extração desse arquivo, um tratamento de dados é realizado utilizando o EXCEL<sup>®</sup> para que somente os itens abaixo sejam selecionados:

- Temperatura do óleo do transformador;
- Temperatura do enrolamento de alta tensão 230 kV do transformador;
- Temperatura do enrolamento de média tensão 138 kV do transformador;
- Temperatura do enrolamento de baixa tensão 13,8 kV do transformador;
- Potência ativa do transformador.

Além desses dados referentes ao transformador, a medida de temperatura ambiente também é gerada por uma estação meteorológica mostrada na figura 18 localizada no mesmo local do transformador.



Figura 18 - Estação Meteorológica para Temperatura Ambiente

O arquivo exportado pelo SAGE é um arquivo no formato texto, como mostrado na figura 19, cada linha é um instante de leitura para todas as medidas adquiridas pelo sistema de todos os equipamentos da subestação.

```

1 Dom out 18 00:00:00 2020
2 c 04020 25
3 PONT0_DIN_ANA001
4 PONT0_DIN_ANA002
5 PONT0_DIN_ANA003
6 PONT0_DIN_ANA004
7 PONT0_DIN_ANA005
8 PONT0_DIN_ANA006
9 PONT0_DIN_ANA007
10 PONT0_DIN_ANA008
11 PONT0_DIN_ANA009
12 PONT0_DIN_ANA010
13 PONT0_DIN_ANA011
14 PONT0_DIN_ANA012
15 PONT0_DIN_ANA013
16 PONT0_DIN_ANA014
17 PONT0_DIN_ANA015

```

Figura 19 - Parte do arquivo de aquisição exportado pelo SAGE

A estrutura do arquivo compreende a declaração de todas as medidas numa primeira varredura, posteriormente a cada intervalo de tempo, o sistema supervisor armazena as medidas naquele instante, sendo elas escritas na mesma ordem de declaração no primeiro ciclo.

```

4018 VCDJ704M25DF
4019 VCDJ704M25DV
4020 VCDJ705M25DAG
4021 VCDJ705M25DF
4022 VCDJ705M25DV
4023 h 00:00:00
4024 *
4025 *
4026 *
4027 *
4028 *
4029 *
4030 *
4031 *
4032 *
4033 *
4034 *
4035 *
4036 *
4037 *
4038 *
4039 *
4040 *
4041 *
4042 *
4043 *
4044 *
4045 *
4046 *

```

Figura 20 - Início da Primeira Aquisição

Nota-se que no lado esquerdo está o número da linha, assim, na figura 20, todas as



variáveis são declaradas até a linha 4022. Após isso um novo ciclo de leitura se inicia, ou seja, na linha 4023 é declarado o instante de leitura e na linha 4024 se inicia a gravação dos valores.

3314	LÀG_TF1-230_MW
3315	LÀG_TF1_TEÀT
3316	LÀG_TF1_TEBT
3317	LÀG_TF1_TEMT
3318	LÀG_TF1_TOLE

Figura 21 - Declaração das Variáveis de Interesse

Na figura 21 estão as variáveis de interesse a serem resgatadas para o estudo, elas estão declaradas por ordem entre as linhas 3314 a 3318. Dessa forma para a leitura do primeiro instante basta navegar 3312 posições a partir da declaração de instante, ou seja, a partir da linha 4023, como mostrado na figura 22.

7335	22.01
7336	33.95
7337	33.04
7338	33.80
7339	32.80

Figura 22 - Medidas do Primeiro Instante

Finalmente se tem as medidas do primeiro instante plotadas na figura 23. Portanto, no instante h:00:00:00 do dia 18/10/21 os valores correspondem:

- Potência Ativa do Transformador = 22,01 MW;
- Temperatura do Enrolamento de Alta Tensão 230 kV = 33,95 °C;
- Temperatura do Enrolamento de Baixa Tensão 13,8 kV = 33,04 °C;
- Temperatura do Enrolamento de Média Tensão 138 kV = 33,80 °C;
- Temperatura do Óleo do Transformador = 32,80 °C.

Esse tipo de coleta de dados feito manualmente seria muito trabalhosa e demandaria um grande tempo, além de poderem acontecer alguns erros humanos na navegação entre os arquivos. Devido a esse problema, utilizou-se a ferramenta EXCEL<sup>®</sup>, onde os arquivos em formato texto foram importados. Após a importação, os dados foram tabulados e com algumas ferramentas do software somente os dados que são necessários para o estudo são selecionados.

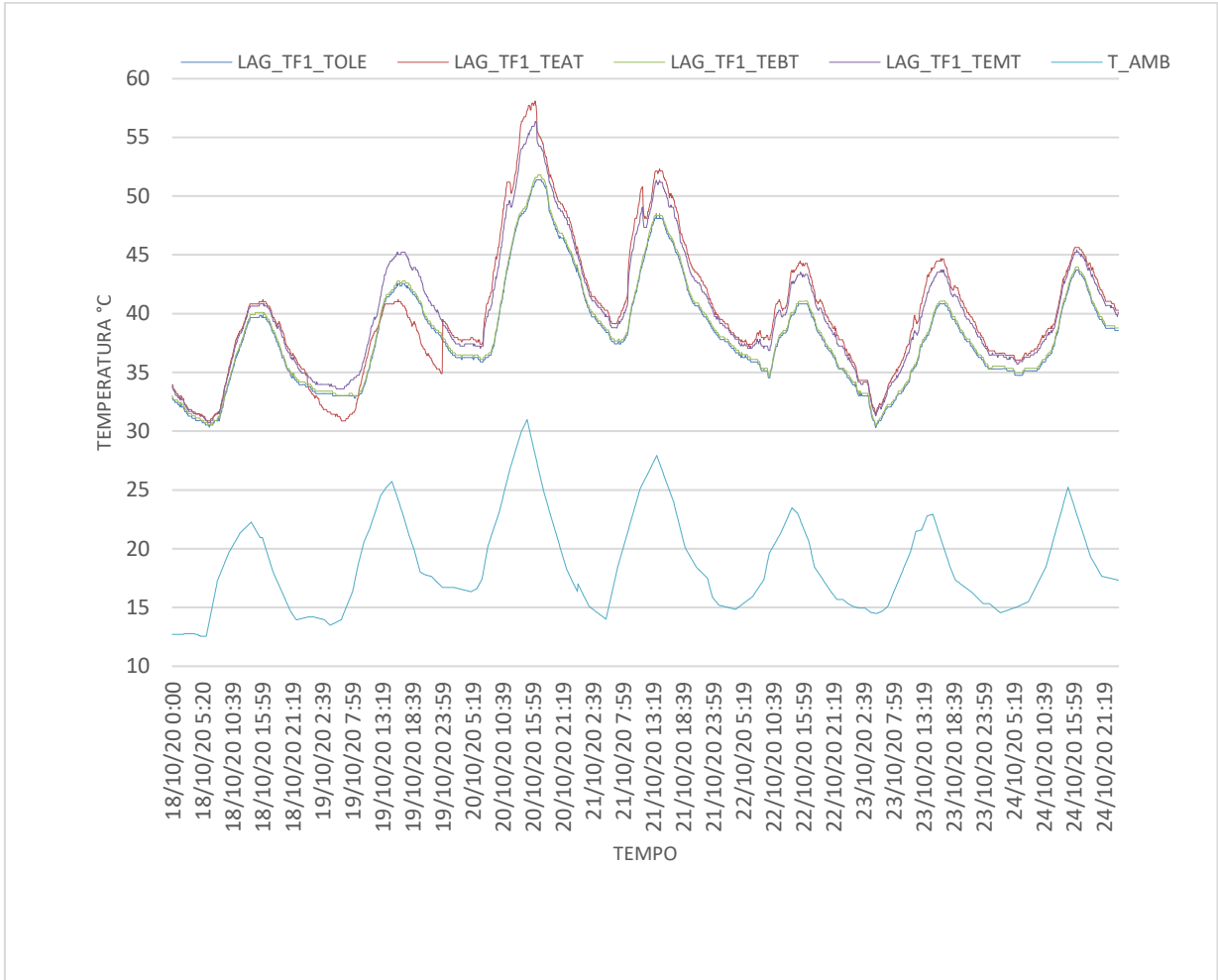


Figura 23 - Medições de Temperatura do Transformador

Com os dados tratados e tabelados algumas condições são propostas para a análise e a validação do modelo como mostradas a seguir:

- Situação 1:
  - Variável dependente: temperatura do óleo;
  - Variáveis independentes: temperatura do enrolamento AT, temperatura do enrolamento MT, temperatura do enrolamento BT, temperatura ambiente e potência ativa;
- Situação 2:
  - Variável dependente: temperatura do óleo;
  - Variáveis independentes: temperatura média do enrolamento (média entre as temperaturas de AT, MT e BT, temperatura ambiente e potência ativa);

- Situação 3:
  - Variável dependente: temperatura do óleo;
  - Variáveis independentes: temperatura ambiente e potência ativa;

## 6. Análise de Resultados

Após a modelagem e a explicação das situações a serem analisadas descritas no capítulo anterior, esse capítulo é destinado à exposição dos resultados gerados para cada simulação feita.

### 6.1. Situação 1

Durante esta análise as condições abaixo serão consideradas:

- Variável dependente: temperatura do óleo;
- Variáveis independentes: temperatura do enrolamento AT, temperatura do enrolamento MT, temperatura do enrolamento BT, temperatura ambiente e potência ativa;

Os resultados estatísticos são apresentados nas tabelas 8 e 9:

Tabela 8 - Estatísticas de Regressão da Situação 1

<b><i>Estatísticas de Regressão – Situação 1</i></b>	
R Múltiplo	0,999911051
R Quadrado	0,99982211
R Quadrado Ajustado	0,999821668
Erro Padrão	0,060892435
Observações	2016

Tabela 9 - Tabela de Coeficientes da Situação 1

	<b><i>Coeficientes</i></b>
Interceção	0,118367098
A	-0,002625893
B	-0,000432405
C	-0,003640285
D	0,950295436
E	0,045194862

Onde:

- A = Potência ativa do transformador;
- B = Temperatura ambiente;
- C = Temperatura do enrolamento AT;
- D = Temperatura do enrolamento BT;
- E = Temperatura do enrolamento MT

Portanto a equação que descreve a regressão para a situação 1 é:

$$T_{OSIT1} = 0,118367098 - 0,002625893A - 0,000432405B - 0,003640285C + 0,950295436D + 0,045194862E \quad (96)$$

Algumas observações podem ser feitas com relação a regressão linear múltipla realizada na situação 1, sabemos que o valor da significância F é menor que 0,05, assim o modelo de observações é válido e possui uma relação. Além disso, o R Quadrado é de 0,99982211, ou seja em 99,982211% das observações o modelo testado descreve a variável dependente.

Na figura 24 mostrado o gráfico de comparação entre as medições da temperatura do óleo do transformador (TF\_TOLE\_Med) com a temperatura do óleo calculado pela equação 96 encontrada através da simulação (TOleoCalc).

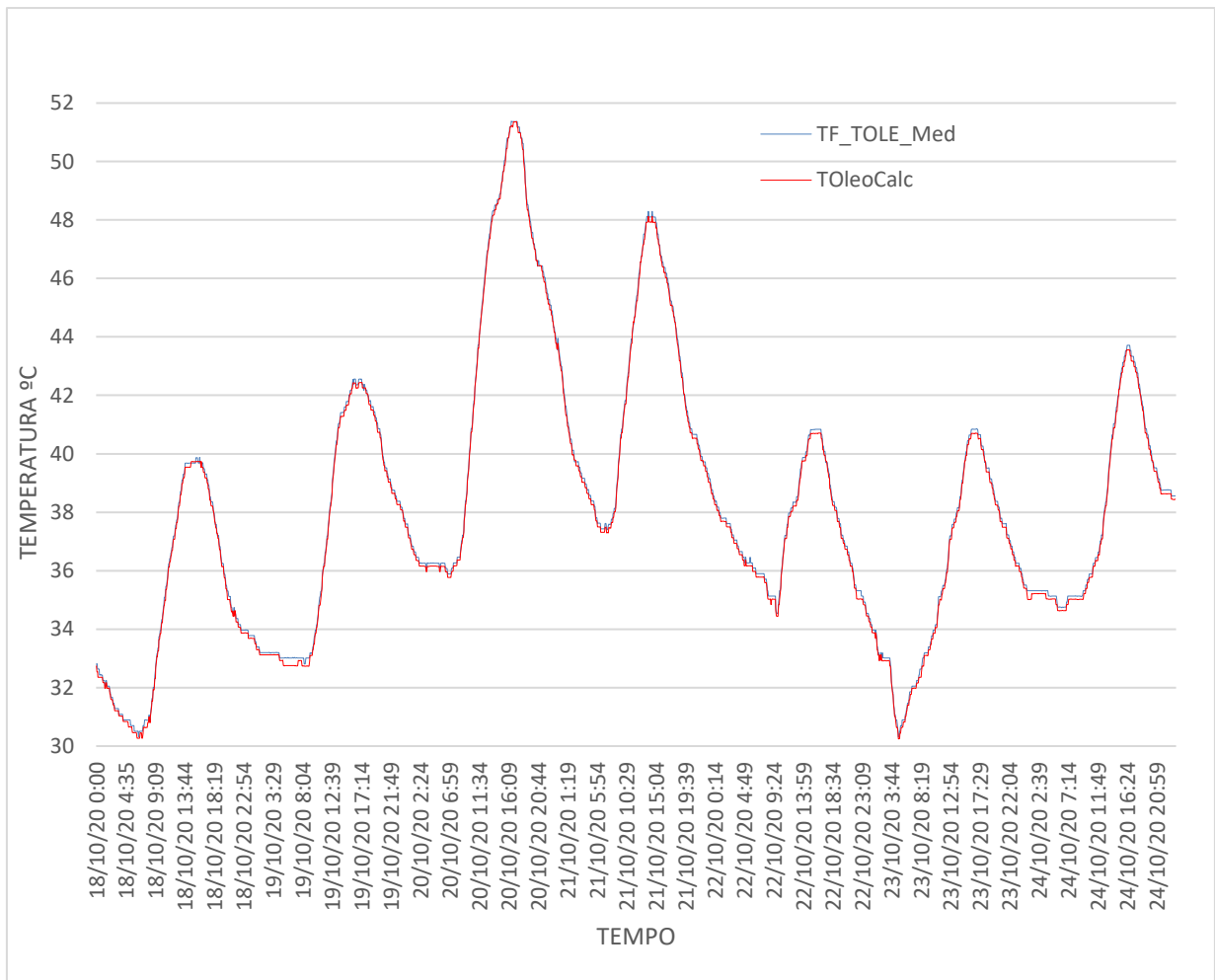


Figura 24 - Comparação entre Temperatura do Óleo Calculada e Medida – Situação 1

## 6.2. Situação 2

Durante esta análise as condições abaixo serão consideradas:

- Variável dependente: temperatura do óleo;
- Variáveis independentes: temperatura média do enrolamento (média entre as temperaturas de AT, MT e BT, temperatura ambiente e potência ativa;

Os resultados estatísticos são apresentados nas tabelas 10 e 11:

Tabela 10 - Estatísticas de Regressão da Situação 2

<b>Estatísticas de Regressão – Situação 2</b>	
R Multiplo	0,993922168
R Quadrado	0,987881277
R Quadrado Ajustado	0,987863207
Erro Padrão	0,502343295
Observações	2016

Tabela 11 - Tabela de Coeficientes da Situação 2

	<b>Coeficientes</b>
Interceção	1,754983084
A	-0,062614203
B	0,016858228
C	0,965744512

Onde:

- A = Potência ativa do transformador;
- B = Temperatura ambiente;
- C = Temperatura média entre os enrolamentos AT, MT e BT;

Portanto a equação que descreve a regressão para a situação 2 é:

$$T_{OSIT2} = 1,754983084 - 0,062614203A + 0,016858228B + 0,965744512C \quad (97)$$

Algumas observações podem ser feitas com relação a regressão linear múltipla realizada na situação 2, sabemos que o valor da significância F é menor que 0,05, assim o modelo de observações é válido e possui uma relação. Além disso, o R Quadrado é de 0,993922168, ou seja em 99,3922168% das observações o modelo testado descreve a variável dependente.

Na figura 25 é mostrado o gráfico de comparação entre as medições da temperatura do óleo do transformador (TF\_TOLE\_Med) com a temperatura do óleo calculado (T\_Oleo\_Calc) pela equação 97 encontrada através da simulação.

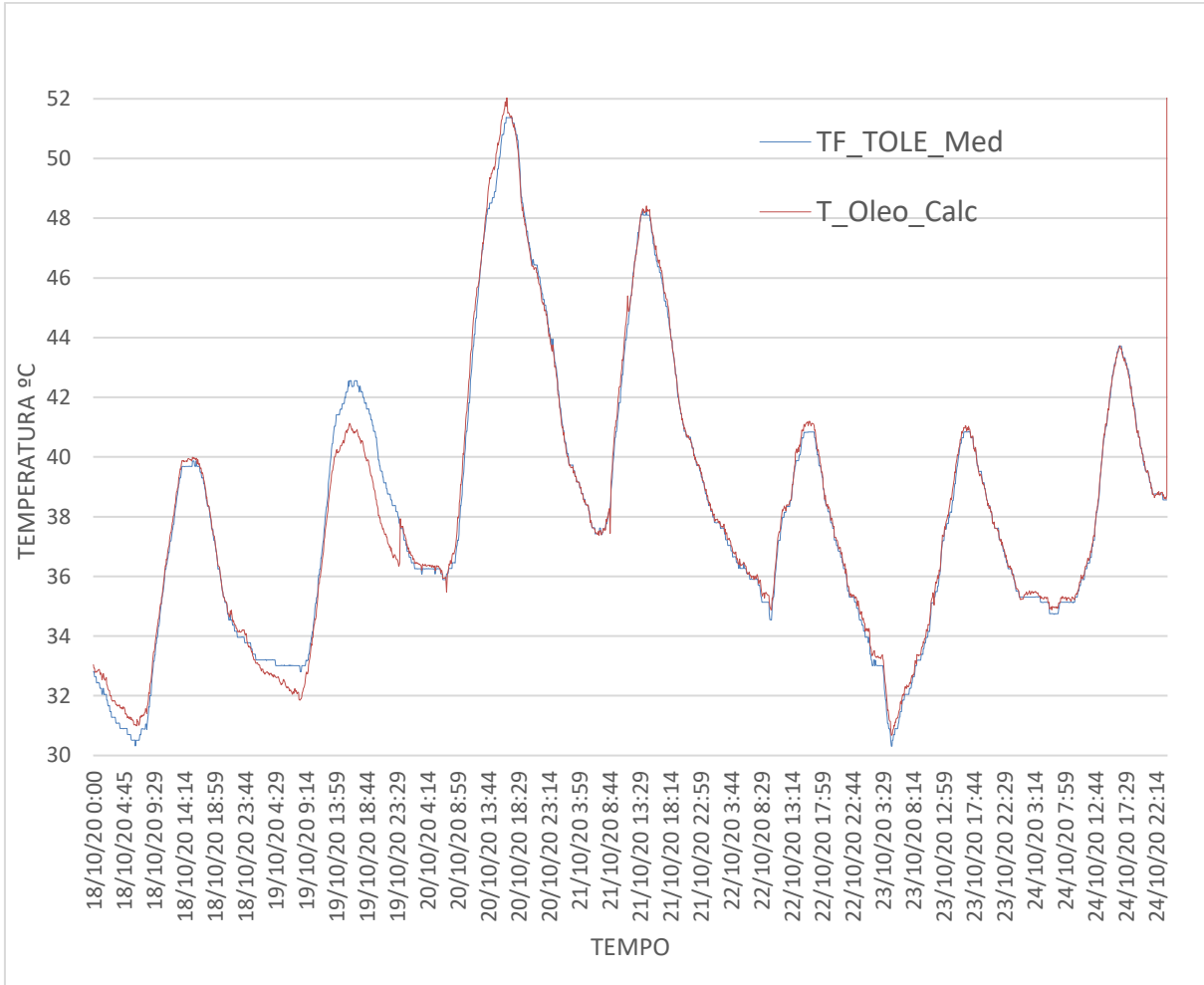


Figura 25 - Comparação entre Temperatura do Óleo Calculada e Medida – Situação 2

### 6.3. Situação 3

Durante esta análise as condições abaixo serão consideradas:

- Variável dependente: temperatura do óleo;
- Variáveis independentes: temperatura ambiente e potência ativa;

Os resultados estatísticos são apresentados nas tabelas 12 e 13:

Tabela 12 - Estatísticas de Regressão da Situação 3

<b><i>Estatísticas de Regressão – Situação 2</i></b>	
R Múltiplo	0,782011
R Quadrado	0,611541
R Quadrado Ajustado	0,611155
Erro Padrão	2,843394
Observações	2016

Tabela 13 - Tabela de Coeficientes da Situação 3

	<b><i>Coeficientes</i></b>
Interceção	22,00724
A	0,052748
B	0,772283

Onde:

- A = Potência ativa do transformador;
- B = Temperatura ambiente;

Portanto a equação que descreve a regressão para a situação 3 é:

$$T_{OSIT3} = 22,00724 + 0,052748A + 0,772283B \quad (98)$$

Algumas observações podem ser feitas com relação a regressão linear múltipla realizada na situação 2, sabemos que o valor da significância F é menor que 0,05, assim o modelo de observações é válido e possui uma relação. Além disso, o R Quadrado é de 0,782011, ou seja em 78,2011% das observações o modelo testado descreve a variável dependente.

Na figura 26 é mostrado o gráfico de comparação entre as medições da temperatura do óleo do transformador (TF\_TOLE\_Med) com a temperatura do óleo calculado (Toleo\_Calc) pela equação 98 encontrada através da simulação.



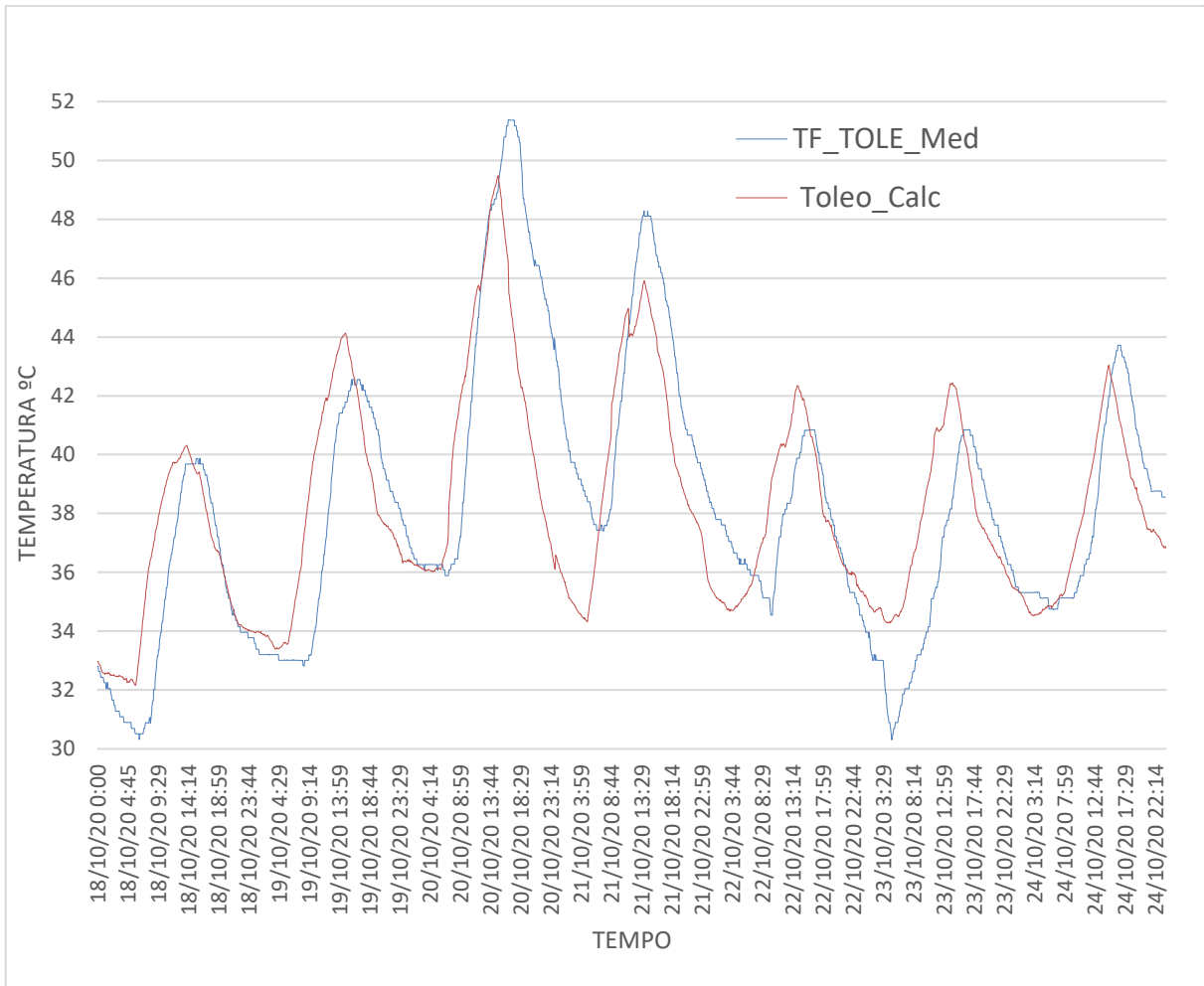


Figura 26 - Comparação entre Temperatura do Óleo Calculada e Medida – Situação 3

## 6.4. Comparação entre as Situações

Finalmente, ao comparar as situações simuladas, nota-se que as variáveis independentes escolhidas representam correlação com a variável dependente estudada. Fica claro que as temperaturas dos enrolamentos influem na temperatura do óleo, assim como a temperatura ambiente e a potência ativa do transformador, confirmando as expectativas quanto aos estudado nos capítulos teóricos.

Um ponto muito importante a ser levado em consideração é a quantidade de variáveis a serem correlacionadas no estudo, nota-se que para a situação 1 onde foi escolhido as temperaturas dos enrolamentos AT, MT e BT do equipamento em conjunto com a temperatura ambiente e a sua potência ativa, se demonstrou mais próximo ao valor medido, pois se parte da premissa que quanto mais variáveis utilizadas, desde que apresentem um grau de relação, maior será a fidelidade do calculado com o medido.

Na situação 2, apesar de se ter utilizado menos variáveis, foi feito um experimento com

a criação de uma medida auxiliar, que corresponde à média aritmética entre as temperaturas dos enrolamentos. Assim, apesar de parecer ser utilizado menor volume de dados, os resultados se demonstraram próximos entre as duas situações. Já na situação 3, o que teve o menor número de medidas de relação com a temperatura do óleo, os resultados foram menos satisfatórios, pois apresentam menor grau de relação. Porém ainda representam uma representação importante quanto ao comportamento entre os valores medidos e calculados.

Uma observação importante para a medida de temperatura ambiente para a etapa desse estudo é com a posição da estação meteorológica. No caso estudado ela fez medições em ambiente da subestação, porém não tão próximo ao equipamento como desejado, pois no equipamento em questão, ele está disposto próximo a outros dois transformadores, sendo assim a temperatura ambiente para ele pode ser um pouco maior.

Na figura 27 foram plotadas todas as situações calculadas juntamente com a temperatura do óleo medida, sendo TF\_TOLE\_TTODOS a situação 1, TF\_TOLE\_TEMedia a situação 2, TF\_TOLE\_POT\_AMB a situação 3 e TF\_TOLE\_Medida a medição da temperatura do óleo.

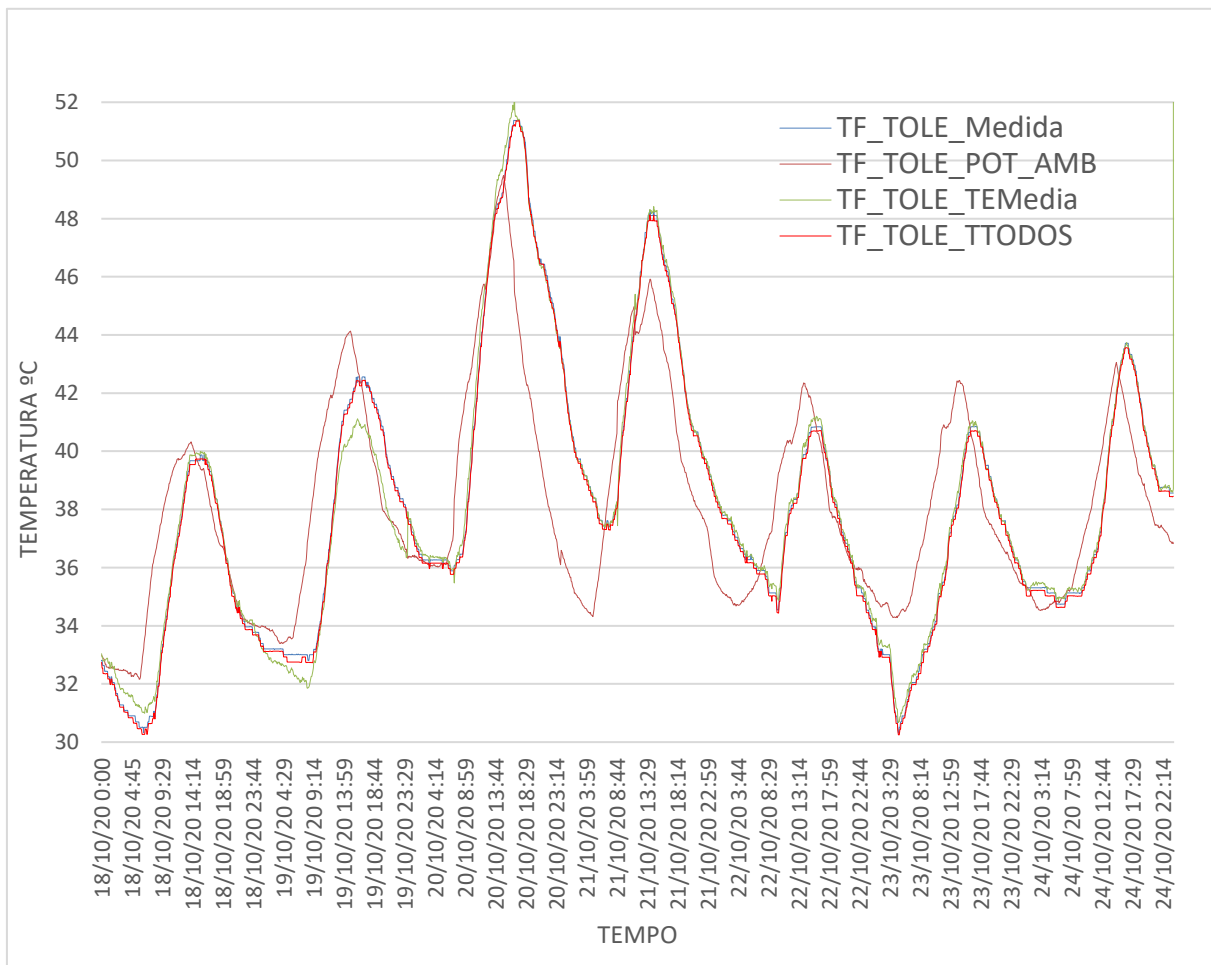


Figura 27 - Gráfico com todas as Situações e a Temperatura Medida do Óleo

Nota-se que os resultados obtidos pela situação 1 e 2 se aproximam dos valores medidos pelo monitor de temperatura, pois apresentaram melhores valores estatísticos da regressão linear com maior correlação entre as variáveis. Já para a situação 3 os valores se afastam um pouco do medido pelo monitor, o que mostra que apenas as duas variáveis independentes (temperatura ambiente e potência ativa) traduzem a temperatura do óleo com menos fidelidade.

## 6.5. Cálculo da Temperatura do Óleo fora da Janela de Observação

Após o teste de regressão feito utilizando a janela de observações escolhida para a construção das equações de cálculo de temperatura do óleo do transformador, essas equações foram testadas para um intervalo de tempo fora do utilizado para regressão com o objetivo de analisar o comportamento em uma aquisição não incluído na regressão. A tabela 14 mostra as informações coletadas para a validação dos modelos em cinco instantes durante um dia de operação.

Tabela 14 - Coleta das Medidas do SAGE de 1 ciclo diário de operação do TF1

<b>Variáveis</b>	<b>00:00</b>	<b>06:00</b>	<b>12:00</b>	<b>18:00</b>	<b>24:00</b>
LAG_TF1-230_MW	25,00	17,50	31,50	42,50	29,0
LAG_TAMB	14,80	12,10	21,80	12,70	12,30
LAG_TF1_TEAT	38,00	36,60	41,10	43,30	37,40
LAG_TF1_TEBT	37,65	36,20	39,40	40,55	36,20
LAG_TF1_TEMT	37,70	36,50	40,70	43,00	37,30
LAG_TE_MEDIO	37,78	36,43	40,40	42,28	36,97
LAG_TF1_TOLE	36,50	35,90	39,20	40,20	35,90

Feito o cálculo da temperatura do óleo para os instantes selecionados, tem-se os resultados expostos na tabela 15, onde está disposto o valor calculado para cada situação nos instantes destacados e o valor medido pelo monitor de temperatura.

Tabela 15 - Comparação entre o Calculado e o Medido

<b>Variáveis</b>	<b>Tempo</b>				
	<b>00:00</b>	<b>06:00</b>	<b>12:00</b>	<b>18:00</b>	<b>24:00</b>
TOLE_SIT1	37,39	35,98	39,16	40,32	35,99
TOLE_SIT2	36,93	36,05	39,17	40,14	35,85
TOLE_SIT3	34,75	32,28	40,50	34,06	33,03
LAG_TF1_TOLE	36,50	35,90	39,20	40,20	35,90

Nas tabelas 14 e 15 foram destacados apenas alguns instantes particulares para efeito comparativo de cálculo. Na figura 28 é apresentado a aplicação das equações geradas nas três situações para o período de um dia de forma a observar a diferença de valores entre as equações encontradas em cada situação testada com o valor medido pelo monitor de temperatura.

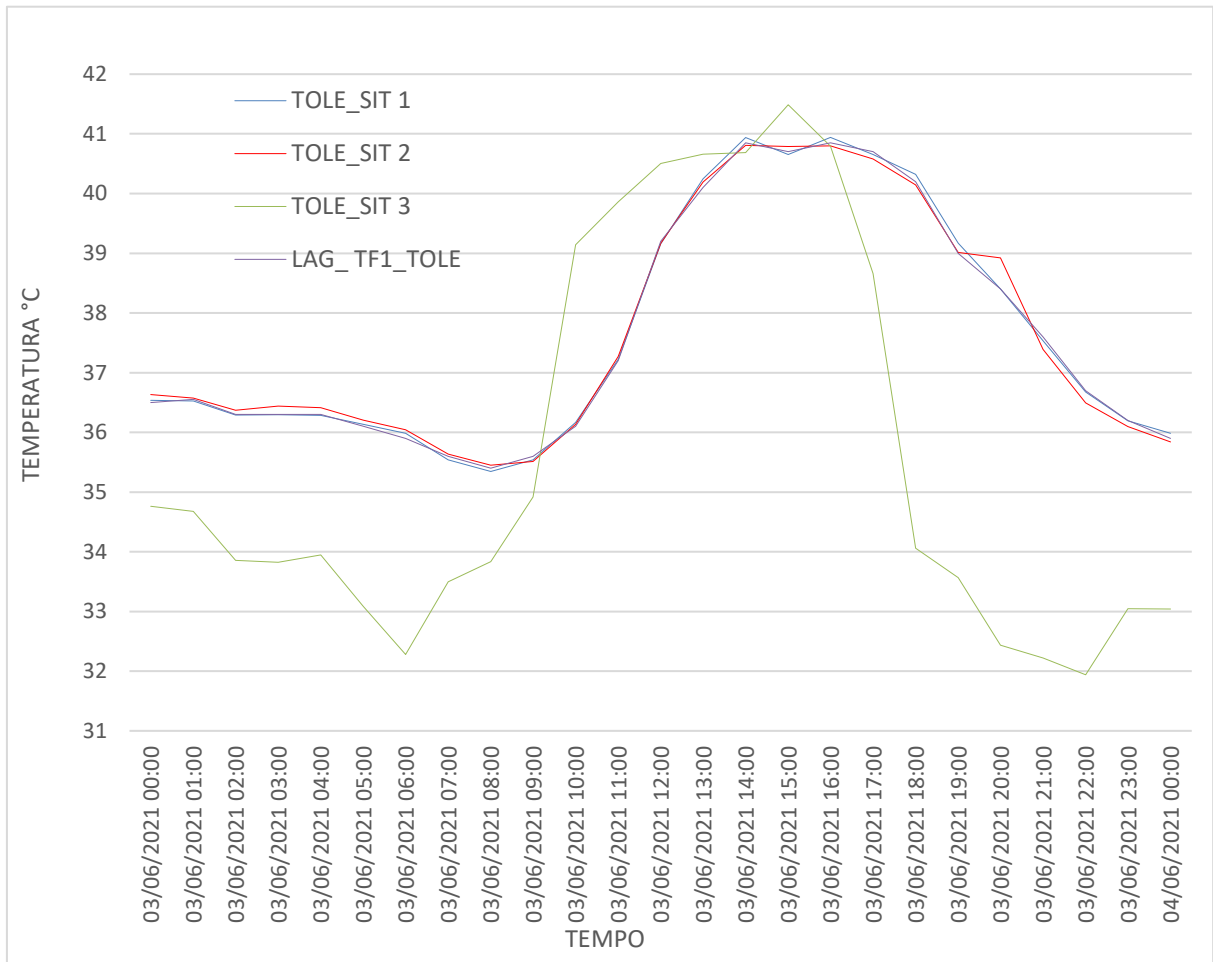


Figura 28 - Cálculo das Situações fora da Janela de Observação.

Nota-se que as equações encontradas no processo de regressão linear seguiram representando o sistema de medição de temperatura do óleo em um período diferente, confirmando a sua viabilidade para o cálculo de temperatura do óleo para esse tipo de transformador, mesmo em instantes diferentes do tempo. Assim, mais uma vez ao comparar as situações simuladas, notamos que quanto mais parâmetros relacionados na regressão, menor será a diferença entre o valor calculado e o medido.

Além disso, alguns cálculos podem ser feitos para equipamentos em condições climáticas diferentes às realizadas nesses casos, nota-se que para a janela de observações utilizada para a regressão, o equipamento se encontrava em outubro com temperaturas ambientes mais altas do que quando as equações foram testadas para valores diferentes dos

utilizados na regressão.

## 7. Conclusões

As empresas concessionárias de energia vêm a algum tempo investindo em equipamentos capazes de interagir com o sistema elétrico buscando a otimização do controle, redução de tempo quanto a atuação em caso de falha, economia de gastos e melhoria de processos de manutenção. Em muitos casos o simples monitoramento em tempo real ajuda os operadores a tomar decisões importantes quanto ao controle dos equipamentos diminuindo assim os tempos de indisponibilidade e redução de penalidades junto aos órgãos regulamentadores. Essas informações, porém, quando apenas guardadas como dados históricos são de certa forma um desperdício de potencial analítico, extração de resultados e de tendências quanto ao comportamento do sistema elétrico.

Esse trabalho propõe a utilização dos dados históricos armazenados pelos sistemas supervisórios com o objetivo de extrair conclusões sobre o comportamento térmico dos transformadores de potência.

Então a partir da utilização dos dados registrados ao longo do tempo de operação do equipamento e o seu tratamento através de tabulação das informações, utilizou-se uma ferramenta matemática de estatística na tentativa de gerar algumas conclusões de operação. Uma vez feita a modelagem dos equipamentos e suas simulações, é possível a utilização dos resultados para diversos fins, seja na questão de planejamento, quando em uma situação de transferência de carga, como o equipamento irá se comportar e o que isso pode afetar na vida útil dele. Outra aplicação possível é a substituição temporária para monitoramento da variável, ou seja, em um caso em que os instrumentos de medição de temperatura do óleo apresentem avaria, por determinado tempo, até a troca é possível estimular a medição através da observação de outras medidas relacionadas ao equipamento.

Os resultados obtidos pelo estudo de caso são satisfatórios e, portanto, nos guiam ao caminho para a utilização do método em aplicações diversas. Um passo importante a ser continuado é a simulação para casos em regiões distintas do país, pois é sabido que o mesmo equipamento pode ser instalado em regiões mais frias como sul do Brasil, como em regiões muito quentes localizadas mais ao norte e próximos à linha do equador.

Como proposta para a continuidade dos estudos desse método é a melhor representatividade da temperatura ambiente, com a implantação de medidores de temperatura em pontos estratégicos da subestação para uma tentativa de média entre eles, a extrapolação para outras regiões, aplicações em equipamentos dispostos em configurações diferentes de subestação e a utilização de novas variáveis de observação. E quanto maior a janela de

observação, maior a sua fidelidade na representação do sistema real.

## 8. Referências

- [1] UMANS, STEPHEN D.; Fitzgerald & Kingsley's Electric Machinery, 7<sup>th</sup> Edition, LLC, New York, 2014.
- [2] FRONTIN, O. SERGIO. Equipamentos de Alta Tensão – Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas. 1<sup>a</sup> Edição, Brasília. 2013.
- [3] KOSOW, IRWING L.; Máquinas Elétricas e Transformadores, Porto Alegre, Globo, 1982;
- [4] HARLOW, JAMES H.; Electric Power Transformer Engineering, TK2551.E65,2004.
- [5] FLANAGAN, WILLIAM M. Handbook of Transformer Design and Application – 2nd Ed. 1992.
- [6] Mamede Filho, João. Manual de Equipamentos Elétricos – 3<sup>a</sup> Ed.- Rio de Janeiro: LTC,2005.
- [7] NBR5356/2020. Transformadores de Potência – Parte 1: Generalidades, ABNT, Rio de Janeiro, 2020.
- [8] ASTM D2140 – 08. Standard Practice for Calculating Carbon-Type Composition of Insulating Oils of Petroleum Origin, 2017.
- [9] NBR5356/2017. Transformadores de Potência – Parte 7: Guia de carregamento para transformadores imersos em líquido isolante, ABNT, Rio de Janeiro, 2020.
- [10] ONS; Diretrizes para a elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão, Rio de Janeiro, 2013;
- [11] UHREN, WILSON. Aplicação de Óleo Vegetal como meio Isolante em Equipamentos Elétricos, em substituição ao Óleo Mineral. Instituto de Engenharia do Paraná (IEP) e Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba,2007.
- [12] RN903/2020 - Submódulo 2.6 – Requisitos Mínimos para Subestações e seus Equipamentos, ONS, 2020.
- [13] RN 861, ANEEL, Plano Mínimo de Manutenção, Brasília, novembro, 2019.
- [14] RIES, WALTER. Transformadores – Fundamentos para Projeto e Cálculo. Porto Alegre, 2007.
- [15] MARTÍN, JUAN C. La Escuela Del Técnico Electricista – Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores, 4<sup>a</sup> Ed, 1960.
- [16] KULKARNI, S.V. & KHAPARDE, S.A. Transformer Engineering Design and Practice, Indian Institute of Technology, Bombay Mumbai, India, 2004.
- [17] Catálogo WEG – Transmissão & Distribuição – Excelência em Tecnologias de Fornecimento de Energia, 2020.
- [18] NBR5356/2007. Transformadores de Potência – Parte 2: Aquecimento, ABNT, Rio de Janeiro, 2007.
- [19] BUSSAB, WILTON DE O. & MORETTIN, PEDRO A. Estatística Básica. 6<sup>a</sup> Edição, 2010.
- [20] HOFFMANN, RODOLFO. Análise de Regressão – Introdução à Econometria. USP,2016.



- [21] SPIEGEL. M.R.; SCHILLER, J. & SRINIVASAN, R. A.; Teoria e Problemas de Probabilidade e Estatística. São Paulo; Ed. Bookman, 2004
- [22] FERREIRA, JORGE LUIZ. Modelagem e Simulação do Regime Térmico-Operativo em Transformadores de Potência – Sistema de Apoio à Decisão. UFRGS,2009.
- [23] DESTEFANI, LUIZ ANTÔNIO. Desenvolvimento de um Modelo Matemático utilizando a Descoberta de Conhecimento Aplicado a Transformadores Trifásicos. UNIJUI, 2018.
- [24] SAGE – Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia. Disponível em: [http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/sage-sistema-aberto-de-gerenciamento-de-energia.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/sage-sistema-aberto-de-gerenciamento-de-energia.htm).

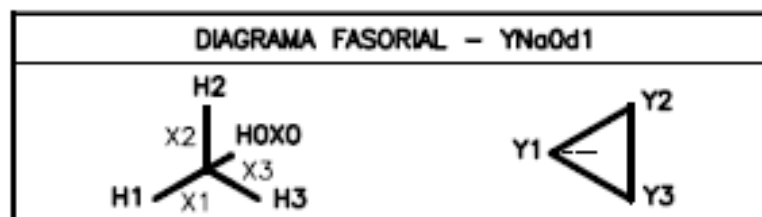
## ANEXO A – Dados de Placa do Transformador

POTÊNCIA NOMINAL CONTÍNUA – (kVA)			
ENROLAMENTO	ONAN	ONAF	ONAF
AT	90000	120000	150000
MT	90000	120000	150000
BT	30000	40000	50000

ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA (°C)	
MÁXIMA TEMPERATURA AMBIENTE	40
MÍNIMA TEMPERATURA AMBIENTE	-5
TOPO DO ÓLEO	65
ENROLAMENTO	65

NÍVEIS DE ISOLAMENTO (ENROLAMENTOS) TENSÕES SUPORTÁVEIS (kV)	AT	MT	N	BT
IMPULSO ATMOSFÉRICO (kV CRISTA)	850	550	110	110
IMPULSO DE MANOBRA (kV CRISTA)	650	–	–	–
TENSÃO APLICADA (kV CRISTA)	34	34	34	34
TENSÃO INDUZIDA LONGA DURAÇÃO (FASE/TERRA)	209/242	–	–	–

RELAÇÃO DE TENSÕES – (kV)
$230 \pm 2 \times 2,5\% / 138 \pm 9 \times 1,11\% - 13,8$



IMPEDÂNCIAS A 85° C		
%	RELAÇÃO - KV	BASE - KVA
	241,5-151,8	150000
	230,0-151,8	150000
	218,5-151,8	150000
	241,5-138,0	150000
	230,0-138,0	150000
	218,5-138,0	150000
	241,5-124,2	150000
	230,0-124,2	150000
	218,5-124,2	150000
	241,5-13,8	50000
	230,0-13,8	50000
	218,5-13,8	50000
	151,8-13,8	50000
	138,0-13,8	50000
	124,2-13,8	50000

MASSA DA PARTE ATIVA EXTRAVEL	51100	kg
MASSA DO TANQUE E ACESSÓRIOS	43300	kg
MASSA PARA TRANSPORTE	87000	kg
MASSA DO ÓLEO	48200	kg
MASSA TOTAL	149800	kg
VOLUME DO ÓLEO	54200	l
ALTURA PARA LEVANTAMENTO DA PARTE ATIVA	8300	mm
PESO DA PARTE ATIVA COM TAMPA E ACESSÓRIOS PARA DESTANQUEAMENTO	61000	kg

CORRENTES MÁXIMAS DE CURTO-CIRCUITO (kA)			
ENROLAMENTO	AT	MT	BT
SIMÉTRICA (2 SEGUNDOS)	4,9	8,7	11
ASSIMÉTRICA (5 CICLOS)	12,5	22,2	28

TANQUE, CONSERVADOR, RADIADORES E ACESSÓRIOS SUPORTAM VÁCUO PLENO E SOBREPRESSÃO 0,05 MPa.

<b>ALTA TENSÃO</b>						
LINHA EM H1, H2, H3 NEUTRO EM HOXO						
CST			TENSÃO (V)	CORRENTE (A)		
POS.	SEL.1	SEL.2		90MVA	120MVA	150MVA
A	S-a	A-c	241500	215,2	288,9	358,6
B	S-b	A-c	235750	220,4	293,9	367,3
C	S-b	A-b	230000	225,9	301,2	376,5
D	S-c	A-b	224250	231,7	308,9	388,2
E	S-c	A-a	218500	237,8	317,1	396,4

<b>MÉDIA TENSÃO</b>						
LINHA EM X1, X2, X3 NEUTRO EM HOXO						
CDC			TENSÃO (V)	CORRENTE (A)		
POS.	INV.	SEL.		90MVA	120MVA	150MVA
1	+	1	151800	342,3	456,4	570,5
2	+	2	150267	345,8	461,1	576,3
3	+	3	148733	349,4	465,8	582,3
4	+	4	147200	353,0	470,7	588,3
5	+	5	145667	356,7	475,6	594,5
6	+	6	144133	360,5	480,7	600,9
7	+	7	142600	364,4	485,8	607,3
8	+	8	141067	368,3	491,1	613,9
9	+	9	139533	372,4	496,5	620,7
10	+/-	K	138000	376,5	502,0	627,6
11	-	1	136467	380,8	507,7	634,6
12	-	2	134933	385,1	513,5	641,8
13	-	3	133400	389,5	519,4	649,2
14	-	4	131867	394,0	525,4	656,7
15	-	5	130333	398,7	531,6	664,5
16	-	6	128800	403,4	537,9	672,4
17	-	7	127267	408,3	544,4	680,5
18	-	8	125733	413,3	551,0	688,8
19	-	9	124200	418,4	557,8	697,3

<b>BAIXA TENSÃO</b>			
LINHA EM Y1, Y2, Y3			
TENSÃO (V)	CORRENTE (A)		
	30 MVA	40 MVA	50 MVA
13800	1255,1	1673,5	2091,8

<b>COMUTADOR DE DERIVAÇÕES EM CARGA</b>	
FABRICANTE:	HUAMING
TIPO:	3x CMI-802/170C 10191W

AUTOTRANSFORMADOR PODE SER SUSPENSO E MOVIMENTADO COMPLETO COM ÓLEO, BUCHAS, RADIADORES, CONSERVADOR E TODOS OS ACESSÓRIOS MONTADOS.
--

TC's 1 A 8 E 10	
RELAÇÃO	TERMINAL
400-5A	S1-S2
600-5A	S1-S3
800-5A	S1-S4
CLASSE	100200
FUNÇÃO	PROTEÇÃO

TC's 7 A 9	
RELAÇÃO	TERMINAL
2500-5A	S1-S2
CLASSE	100200
FUNÇÃO	PROTEÇÃO

TC 11	
RELAÇÃO	TERMINAL
500-5A	S1-S2
CLASSE	1,2 C25
FUNÇÃO	IM. TÉRMICA

TC 12	
RELAÇÃO	TERMINAL
800-5A	S1-S2
CLASSE	0,8 C25
FUNÇÃO	CDC

TC 13	
RELAÇÃO	TERMINAL
800-9A	S1-S2
CLASSE	1,2 C25
FUNÇÃO	IM. TÉRMICA

TC 14	
RELAÇÃO	TERMINAL
2500-5A	S1-S2
CLASSE	1,2 C25
FUNÇÃO	IM. TÉRMICA

